



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL PARA
PRODUÇÃO DE POSTES DE CONCRETO ARMADO
EXPOSTOS À AMBIENTE LITORÂNEO**

Luis Carlos Brentano

Lajeado, julho de 2018

Luis Carlos Brentano

**DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL PARA
PRODUÇÃO DE POSTES DE CONCRETO ARMADO
EXPOSTOS À AMBIENTE LITORÂNEO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, sendo parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, julho de 2018

Luis Carlos Brentano

**DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL PARA
PRODUÇÃO DE POSTES DE CONCRETO ARMADO
EXPOSTOS À AMBIENTE LITORÂNEO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Prof. Me. Rafael Mascolo – orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Me. Douglas Ferreira Velho
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Me. João Batista Gravina
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, 4 de julho de 2018

AGRADECIMENTOS

A vida é feita de etapas, sendo que cada uma possui uma importância distinta. O trabalho de conclusão de curso é uma delas, sendo o último passo para a tão esperada formatura do ensino superior.

Foram longos seis anos e meio de uma caminhada árdua e desafiadora, em que não seria possível sem a ajuda de pessoas especiais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me guiando diante das dificuldades encontradas. Por isso, gostaria de agradecer imensamente o total apoio da minha família, a base de tudo, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis. Pai Astor, mãe Ivete, sou extremamente grato pela oportunidade que me deram de poder tornar este sonho realidade, e de contar com o apoio de vocês durante esta etapa. As mesmas palavras servem de agradecimento para minha irmã Carla, sempre atenciosa e prestativa.

A minha amada namorada Raiana, que esteve ao meu lado praticamente toda a graduação, sendo paciente e compreensiva nos momentos em que estive ausente. Sem dúvida, seus conselhos foram essenciais para que esta caminhada se tornasse vitoriosa.

Por fim, aos queridos professores desta instituição, que fizeram o possível para repassar todo o conhecimento que dispunham. Agradeço em especial ao professor e mestre Rafael Mascolo, que me orientou com dedicação nesta pesquisa, sendo que minha escolha não poderia ter sido diferente, visto que possui vasto conhecimento no assunto abordado.

RESUMO

No Brasil, até a segunda metade do século passado, as redes de energia elétrica existentes eram compostas principalmente por postes de madeira. No entanto, com o aumento da demanda, foi necessária a construção de redes com maior capacidade, implicando em um significativo crescimento da procura por postes de concreto armado, visto que estes apresentam maior resistência e durabilidade que os de madeira, aumentando a vida útil das estruturas. Dessa maneira, se mostra importante a realização de estudos que busquem adequar a vida útil dessas estruturas em relação ao desempenho requerido. Um dos parâmetros determinantes na durabilidade de postes de concreto armado é a qualidade do concreto, que além das propriedades mecânicas é o responsável pela proteção das armaduras em relação ao ingresso de agentes agressivos no meio em que está exposto. Considerando zonas naturais não poluídas, o ambiente marinho é o que apresenta maior índice de agressividade, pois os íons de cloreto, presentes em ambientes próximos ao mar, são extremamente agressivos às armaduras e consequentemente causam a degradação das estruturas de concreto armado. Assim, a partir de um traço de concreto autoadensável empregado por uma empresa fabricante de postes de concreto armado da cidade de Teutônia/RS, foi proposta uma adequação a mistura utilizada para que atenda as exigências de desempenho estabelecidas pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) para a classe de agressividade ambiental III, procurando adequar as características relacionadas à durabilidade e ao custo-benefício do traço utilizado, substituindo parte do cimento por adições minerais. Assim sendo, foram desenvolvidos 5 traços, um referência, similar ao utilizado na fábrica, e outros quatro traços com teores de 10% e 20% de cinza de casca de arroz e sílica ativa em substituição ao cimento. Para avaliar as propriedades de durabilidade das misturas, foram realizados ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão, absorção de água por imersão, penetração de cloretos, e por fim, uma análise de custos para determinar qual o traço com maior viabilidade financeira de aplicação. Conclui-se que os traços com utilização de 10% e 20% de sílica ativa atenderam o desempenho mínimo requerido pela empresa e pelas normas vigentes, sendo que o traço com 10% de sílica ativa destacou-se como sendo o mais barato a ser empregado.

Palavras-chave: Poste de concreto. Concreto autoadensável. Durabilidade. Adições minerais.

ABSTRACT

In Brazil, until the second half of the last century, the existing electric power network were composed mainly of wooden poles. However, with the increase in demand, it was necessary to build networks with higher capacity, implying a significant increase in the demand for reinforced concrete poles, since these have greater strength and durability than the ones of wood, increasing the useful life of the structures. Thus, it is important to carry out studies that seek to adapt the useful life of these structures regarding the required performance. One of the determining parameters in the durability of reinforced concrete poles is the concrete quality, which besides the mechanical properties is responsible for the protection of the reinforcement considering the entrance of aggressive agents in the environment where it is exposed. Considering non-polluted natural areas, the marine environment is the one with the highest aggressiveness, because the chloride ions, present in environments near the sea, are extremely aggressive to the reinforcement and consequently cause the degradation of the structures of reinforced concrete. Therefore, from a self-compacting concrete trait used by a manufacturer of reinforced concrete poles in the Vale do Taquari region, a suitability was proposed for the mixture used to meet the performance requirements established by NBR 8451-1 (ABNT, 2011) for the environmental aggression class III, seeking to adapt the characteristics related to the durability and cost-benefit of the traces used, replacing part of the cement with mineral additions. So 5 traces were developed, a reference, similar to the one used in the factory, and other four traces with contents of 10% and 20% of rice husk ash and active silica replacing the cement. In order to evaluate the durability properties of the mixtures, tests of workability, compressive strength, water absorption by immersion and chloride penetration were performed, and finally, a cost analysis was carried out to determine which trait had the highest financial feasibility of application. The conclusion was that the traces using 10% and 20% of active silica met the minimum performance required by the company and the current standards, and the trace with 10% active silica stood out as being the cheapest to be used.

Keywords: Concrete poles. Self-compacting concrete. Durability. Mineral Additions.

LISTA DE ILUSTRÇÕES

Figura 1 - Sistema elétrico de potência	15
Figura 2 - Sistema aéreo de distribuição de energia elétrica.....	17
Figura 3 - Análise visual da coesão de amostras de concreto autoadensável	33
Figura 4 - Fluxograma dos materiais e métodos que serão empregados	44
Figura 5 - Amostra dos agregados	45
Figura 6 - Curva granulométrica da areia fina	48
Figura 7 - Curva granulométrica da areia média	48
Figura 8 - Curva granulométrica da brita 0	48
Figura 9 - <i>Slump Flow Test</i>	50
Figura 10 - Detalhes e dimensões da caixa L	51
Figura 11 - Indicativo das alturas H1 e H2	52
Figura 12 - Máquina de ensaio para rompimento de corpos de prova	53
Figura 13 - Divisão dos corpos de prova para o ensaio de difusão de cloretos	56
Figura 14 - Primeira etapa do ensaio de penetração de cloretos	57
Figura 15 - Amostras do ensaio <i>Slump Flow Test</i>	61
Figura 16 - Amostras do ensaio <i>L-Box Test</i>	62
Figura 17 - Ganho de resistência à compressão em função da idade	63
Figura 18 - Comparativo de teores de absorção de água encontrados nos ensaios.....	65
Figura 19 - Rompimentos de CPs à compressão diametral e dispersão de nitrato de prata	66
Figura 20 - Comparativo das alturas de penetração de cloretos	67
Figura 21 - Altura de penetração de cloretos em uma amostra de cada traço	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental	20
Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	20
Tabela 3 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição.....	21
Tabela 4 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos	22
Tabela 5 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto	22
Tabela 6 - Teores de absorção de água para postes de concreto armado	23
Tabela 7 - Nomenclatura dos traços	44
Tabela 8 - Proporções do traço atualmente utilizado pela empresa.....	44
Tabela 9 - Proporções do traço referência adotado para a pesquisa.....	44
Tabela 10 - Propriedades dos materiais empregados nas dosagens.....	47
Tabela 11 - Composição dos traços utilizados	60
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de <i>Slump Flow Test</i> e <i>L-Box Test</i>	62
Tabela 13 - Resultados de resistência à compressão dos traços estudados	63
Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	64
Tabela 15 - Análise das alturas de penetração de cloretos de cada traço analisado	67
Tabela 16 - Comparação de custo de traços: referência pesquisa x referência empresa	70
Tabela 17 - Comparação de custo de traços com utilização de adições minerais	70
Tabela 18 - Comparativo entre os resultados obtidos de cada traço	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo geral	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 Estrutura do trabalho	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 A distribuição de energia elétrica	15
2.2 Postes de concreto armado	17
2.2.1 Histórico.....	18
2.2.2 Tipos e geometrias.....	18
2.2.3 Requisitos quanto à durabilidade	19
2.3 Materiais constituintes.....	23
2.3.1 Aço	24
2.3.2 Concreto.....	24
2.3.2.1 Cimento Portland.....	26
2.3.2.2 Agregados.....	26
2.3.2.3 Água.....	27
2.3.2.4 Aditivos.....	28
2.3.2.5 Adições minerais.....	29
2.3.2.5.1 Cinza de casca de arroz.....	30
2.3.2.5.2 Sílica Ativa	30
2.4 Características do concreto	31
2.4.1 Concreto no estado fresco	31

2.4.1.1 Trabalhabilidade	31
2.4.1.1.1 Consistência	32
2.4.1.1.2 Coesão	32
2.4.1.2 Ensaios para avaliar a trabalhabilidade do CAA	34
2.4.2 Concreto no estado endurecido	34
2.4.2.1 Resistência à compressão	35
2.4.2.2 Durabilidade do concreto	35
2.4.2.2.1 Porosidade.....	36
2.4.2.2.2 Permeabilidade	37
2.4.2.2.3 Absorção de água por capilaridade e imersão	37
2.4.3 Agentes agressivos.....	38
2.4.3.1 Corrosão das armaduras	39
2.4.3.2 Ataque por cloretos.....	40
 3 METODOLOGIA	 43
3.1 Materiais.....	44
3.1.1 Descrição dos materiais	45
3.1.2 Ensaios de caracterização dos materiais.....	46
3.2 Métodos.....	49
3.2.1 Controle de trabalhabilidade	49
3.2.1.1 Método do cone de Abrams - <i>Slump Flow Test</i>	49
3.2.1.2 Método da caixa L - <i>L-Box Test</i>	50
3.2.2 Resistência à compressão	52
3.2.3 Absorção de água por imersão	54
3.2.4 Penetração de cloretos - análise visual por aspersão de nitrato de prata	55
3.2.5 Relação custo-benefício	57
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 59
4.1 Comportamento do concreto no estado fresco.....	59
4.1.1 <i>Slump Flow Test</i>	60
4.1.2 <i>L-Box Test</i>	61
4.2 Resistência à compressão	62
4.3 Absorção de água por imersão	64
4.4 Penetração de cloretos - análise visual por aspersão de nitrato de prata...	66

4.5 Relação custo-benefício	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica revolucionou, e ainda revoluciona a vida de milhares de pessoas, melhorando expressivamente a qualidade de vida das mesmas. Na atualidade, a eletricidade é imprescindível à sociedade, pois além de atender as necessidades do ser humano, é implantada sob um baixo custo, se comparada com outras fontes de energia, e produzida com certa facilidade (REGINATO, 2014).

Nas últimas décadas, os progressos tecnológicos provenientes do elevado desenvolvimento na área da eletrônica, foram transferidos sistematicamente para os novos produtos e equipamentos, beneficiando os consumidores e fazendo com que o consumo de energia elétrica per capita aumentasse. Com esse aumento da demanda, tornou-se necessária a criação de uma complexa rede conhecida como Sistema Elétrico de Potência (SEP), o qual é dividido em três setores: geração, transmissão e distribuição (GARCIA e DUZZI JR., 2012; TOSTES, 2012).

No SEP, a energia é conduzida das grandes usinas de geração através das linhas de transmissão que, em seguida é disseminada para o sistema de distribuição, o qual se encarrega de distribuir a energia por meio de redes elétricas aos pontos de consumo. O cabeamento elétrico no Brasil é formado principalmente por redes aéreas que são sustentadas por postes (GARCIA e DUZZI JR., 2012).

De acordo com Reginato (2014), os postes utilizados para redes aéreas de energia são fabricados com diversos materiais, merecendo destaque os polímeros, a madeira e o concreto armado.

No Brasil, conforme Giacon Júnior (2009), as redes de energia existentes até a segunda metade do século passado, eram compostas, em sua maioria, por postes de madeira. Porém, devido ao aumento de consumo de energia elétrica e o constante crescimento tecnológico, foi preciso construir redes com maior capacidade. Dessa forma, houve uma procura significativa de postes de concreto armado, visto que esse material teria maior durabilidade e resistência que a madeira, aumentando a expectativa de vida útil do mesmo.

Inicialmente, imaginava-se que os postes de concreto armado teriam infinita durabilidade não precisando de manutenção. Entretanto, estes aspectos não são encontrados em nenhum tipo de material, pois todos se desgastam e perdem resistência durante sua vida útil (GIACON JÚNIOR, 2009).

Diversas fábricas de postes de concreto surgiram após a elevada demanda, porém, nem todas seguiam o mesmo padrão de qualidade. Dessa forma, devido à deficiência no controle de qualidade na produção, muitos postes de concreto apresentaram manifestações patológicas, que por diversas ocasiões eram percebidas apenas após a instalação nas redes (GIACON JÚNIOR, 2009).

Segundo Hoffmann (2001), a perspectiva de vida útil das estruturas de concreto baseia-se nos mecanismos de transporte de água, íons e gases através da porosidade do concreto. Dessa maneira, prova-se extremamente importante realizar pesquisas que busquem revelar o desempenho de diversos concretos utilizados, não levando em consideração apenas as propriedades mecânicas, mas também em relação à durabilidade, por meio de parâmetros quantitativos, analisando suas particularidades e as condições de exposição na qual a estrutura será inserida.

Kopsch (2001) explica que em ambientes naturais não poluídos, a atmosfera que apresenta maior agressividade é a marinha. Exatamente por se situarem próximas ao mar, as regiões litorâneas são zonas em que a execução de estruturas de concreto armado deve ser planejada com cuidado, pois existem sais corrosivos (à base de cloretos), presentes tanto na água do mar quanto no ambiente, dispersos pela maresia, que afetam diretamente a durabilidade do elemento estrutural. O autor ressalta ainda, que o risco de deterioração da estrutura pode ser maior dependendo das características dos materiais e métodos construtivos empregados.

Visto que os postes de concreto armado são elementos de extrema relevância para o sistema aéreo de distribuição de energia elétrica, torna-se imprescindível que estes garantam total segurança no fornecimento de eletricidade aos consumidores, evitando que aconteçam problemas, como eventuais colapsos das estruturas. Dessa forma, com o intuito de realizar um estudo em conjunto com uma empresa fabricante de estruturas de concreto armado da cidade de Teutônia/RS, tem-se o objetivo de adequar uma mistura já utilizada para a classe de agressividade ambiental II, de modo que atenda as exigências de desempenho estabelecidas pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) para a produção de postes empregados em regiões litorâneas atendendo a classe de agressividade ambiental III (CAA III).

Contudo, as características relacionadas à durabilidade do traço utilizado serão adequadas, substituindo parte do cimento por adições minerais de cinza de casca de arroz (CCA) e sílica ativa. Ainda, dentre os traços estudados, será destacado aquele que possuir o melhor custo-benefício de fabricação, considerando apenas o valor comercial dos materiais empregados.

1.1 Objetivo geral

A partir de um traço de concreto autoadensável (CAA) empregado atualmente por uma empresa fabricante de postes de concreto armado, pretende-se substituir parte do cimento por variados teores de adições minerais. O objetivo é verificar o atendimento aos critérios de durabilidade do concreto, estabelecidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), para a classe de agressividade ambiental III, e determinar o traço com melhor custo-benefício para aplicação em postes de concreto armado.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de diferentes teores de adições minerais no concreto autoadensável no estado fresco e endurecido;
- Avaliar as propriedades dos traços em estado fresco quanto à coesão, fluidez e segregação;

- Avaliar as propriedades mecânicas do concreto em relação à resistência à compressão;
- Avaliar os custos dos traços de concreto quanto aos materiais empregados.

1.3 Estrutura do trabalho

A monografia estrutura-se em três capítulos, sendo que o primeiro dedica-se à introdução, na qual é abordada uma breve apresentação dos dois capítulos seguintes, e os objetivos geral e específicos que motivaram a realização desta pesquisa. O referencial teórico, apresentado no segundo capítulo, destina-se à descrição dos requisitos e características de postes para redes de energia elétrica, propriedades e materiais constituintes do concreto convencional e autoadensável, assim como agentes que apresentam agressividade às estruturas.

No terceiro capítulo, procurou-se apresentar o programa experimental, os métodos adotados para realizar o estudo bem como as propriedades dos materiais que serão empregados. Portanto, foram explicados, por meio de normas vigentes, os procedimentos para caracterização dos materiais utilizados, os ensaios para avaliar a resistência e a durabilidade do concreto, para que posteriormente os resultados possam ser comparados.

O quarto capítulo é reservado à discussão dos resultados adquiridos nos ensaios propostos, no qual são expostas as avaliações obtidas acerca das propriedades mecânicas e da durabilidade dos traços de concreto executados. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais da presente pesquisa, apontando a mistura que se adequa da melhor forma às necessidades requeridas e sugerindo pesquisas futuras que possam contribuir para o aperfeiçoamento do presente estudo.

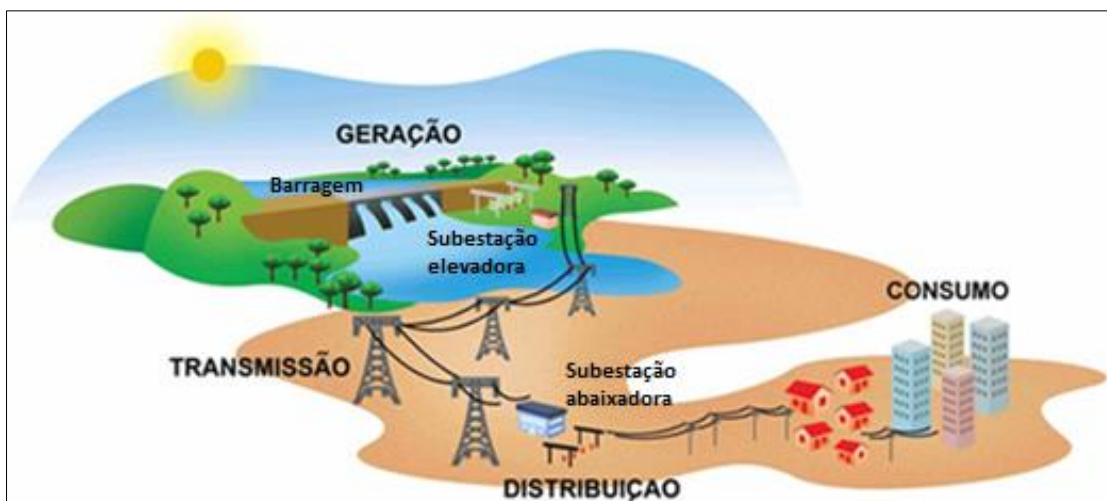
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A distribuição de energia elétrica

Atuando como parte do sistema elétrico, a distribuição de energia, ou sistema elétrico de potência, como também pode ser chamado, é dividido em três grandes departamentos: geração, transmissão e distribuição (FIGURA 1). Esse sistema deve garantir aos consumidores que a energia elétrica seja transportada de maneira segura, eficiente e com qualidade (GARCIA; DUZZI JR., 2012; TOSTES, 2012).

As redes de energia elétrica foram construídas com a necessidade de conduzir a energia gerada nas usinas hidrelétricas, térmicas, eólicas, termonucleares, etc., até o consumidor final, seja ele residente de um grande centro urbano ou de uma área rural (ABRADEE, 2014).

Figura 1 - Sistema elétrico de potência



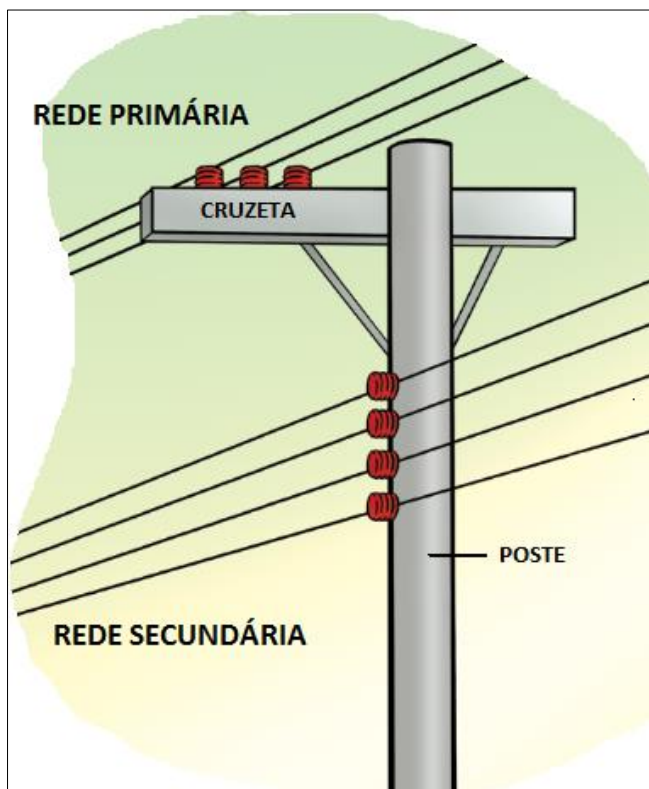
Fonte: Adaptado de Abradee (2014).

As redes ou linhas de transmissão (LTs), com tensão de fornecimento superior ou igual a 230 kilo Volts (kV), são compostas por fios condutores metálicos, suspensos em grandes torres através de materiais que possuem propriedades isolantes, como é o caso do isolador cerâmico ou de vidro. As LTs são encarregadas de levar energia em alta tensão por longas distâncias, das subestações elevadoras, localizadas na saída das usinas geradoras, às subestações abaixadoras situadas em locais onde existam grandes consumidores, que podem ser tanto fábricas com alto consumo de energia quanto às empresas distribuidoras de energia, que são responsáveis pelo transporte de energia aos pequenos consumidores. As linhas de transmissão com tensão entre 69 e 138 kV, também conhecidas como linhas de subtransmissão, são de responsabilidade das empresas distribuidoras (ABRADEE, 2014).

O sistema de distribuição inicia a partir da subestação abaixadora, vai até os pontos de consumo, podendo ser dividido em duas partes. A rede primária, que compreende as subestações de distribuição (alimentadas pelas linhas de subtransmissão ou de transmissão), das quais saem os alimentadores primários que alimentarão os transformadores de distribuição; e rede secundária, parte dos transformadores de distribuição, dos quais saem os alimentadores secundários que vão até os ramais de serviço ou de ligação. Dessa forma, a energia elétrica é distribuída aos consumidores que estão conectados à rede de distribuição, seja ela aérea, sustentada por postes, ou subterrânea na qual os cabos passam por dutos enterrados nas calçadas (GARCIA; DUZZI JR., 2012; TOSTES, 2012).

A rede primária, também chamada de média tensão, possui tensão elétrica entre 2,3 e 44 kV. Já a rede secundária, ou de baixa tensão, pode variar entre 110 e 440 Volts (V). No sistema de distribuição aéreo, as redes primárias são facilmente vistas, pois são comumente compostas por três fios condutores, dispostos sobre cruzetas instaladas horizontalmente no topo dos postes (FIGURA 2). As redes secundárias aéreas (FIGURA 2) são afixadas nos mesmos postes que sustentam as redes primárias, porém situam-se verticalmente a uma altura inferior (ABRADEE, 2014).

Figura 2 - Sistema aéreo de distribuição de energia elétrica



Fonte: Adaptado de Abradee (2014).

Como já mencionado, o sistema aéreo de distribuição de energia elétrica, é sustentado por rudimentos, nomeados postes, os quais são fabricados de variados materiais e formas. Os materiais que merecem destaque na produção de postes são o polimérico, a madeira e o concreto armado (REGINATO, 2014).

2.2 Postes de concreto armado

De acordo com a NBR 8451-1 (ABNT, 2011), os postes de concreto armado são descritos como estruturas pré-fabricadas de concreto classificados conforme o comprimento, formato e resistência. Dessa maneira, são elementos estruturais utilizados em linhas aéreas de distribuição e transmissão de energia, também servindo como suporte para a iluminação de vias públicas.

Em virtude de avanços tecnológicos, facilidade de fabricação e baixo custo, os postes de concreto armado surgiram como principais substitutos aos postes de madeira, utilizados nas redes de distribuição de energia (REGINATO, 2014).

2.2.1 Histórico

As redes de energia no Brasil, que apresentaram um grande desenvolvimento a partir dos anos de 1950, eram constituídas principalmente por postes de madeira, assim como postes em aço, derivados de antigas linhas férreas, e de concreto, fabricados em formato quadrado com utilização de fôrmas de madeira. A partir de um dado momento, as redes tiveram que ser expandidas devido à grande demanda elétrica exigida pelas indústrias e pela agricultura, em função da utilização de motores e equipamentos elétricos mais potentes. Assim, seguindo os critérios existentes, as redes foram ampliadas com o emprego de postes de madeira. Entretanto, pouco tempo depois de instalados, estes começaram a apresentar problemas devido à sua durabilidade. Na área rural, muitos postes eram danificados pelo fogo, e em áreas urbanas, a durabilidade dos postes era afetada pelo apodrecimento. Portanto, como alternativa, foram empregados postes de concreto armado, com a expectativa de que estes possuíam alta durabilidade e resistência (GIACON JÚNIOR, 2009).

Consoante Giacon Júnior (2009), à princípio, acreditava-se que os postes de concreto armado teriam durabilidade ilimitada e que não precisariam de manutenção. Contudo, esses aspectos não são encontrados em nenhum material construtivo, pois ao longo do tempo, todos se desgastam e perdem resistência. Ainda, a vida útil desses elementos pode variar de acordo com os materiais, características e os cuidados envolvidos na fabricação dos mesmos, assim como as condições ambientais às quais serão expostos.

2.2.2 Tipos e geometrias

A produção de postes de concreto armado é realizada de duas maneiras: sistema convencional ou centrifugado. No método convencional, o concreto lançado dentro das fôrmas, é adensado por vibração através de vibradores de imersão ou de alta frequência, que são acoplados externamente aos moldes. Porém, se for utilizado concreto autoadensável dispensa-se o adensamento por vibração (DE SÁ; LENZI, 2003).

Nos postes produzidos pelo sistema centrífugado, a fôrma é preenchida de concreto, fechada e disposta em uma centrífuga de alta rotação. Dessa forma, através da força centrífuga, o concreto sofre compressão contra a parede do molde, adensando-o e eliminando a quantia de água em excesso na mistura (DE SÁ; LENZI, 2003).

Sobre a geometria, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) determina três tipos: seção retangular, seção duplo T e seção circular vazada.

Os postes de seção circular vazada possuem formato tronco cônico e podem ser fabricados tanto pelo sistema convencional quanto pelo centrífugado. No processo convencional a seção vazada é realizada por meio de mandris metálicos que são sacados durante o processo de cura, e no centrífugado, o próprio procedimento gera a seção. Os postes duplo T possuem seção em “H” e os postes retangulares podem ou não possuir a seção vazada. Ambos têm formato tronco piramidal e são produzidos pelo processo convencional (REGINATO, 2014).

2.2.3 Requisitos quanto à durabilidade

Conforme a NBR 8451-1 (ABNT, 2011), os postes fabricados devem possuir no mínimo 35 anos de vida útil contados a partir da data de produção, admitindo-se um percentual de falhas de 1% a cada 5 anos após os 5 primeiros anos, tendo como parâmetro o lote adquirido. Durante o tempo de vida útil estabelecido, o poste de concreto deve manter sua forma original, assim como sua qualidade e características quando em contato com o meio ambiente, devendo assim, resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outra forma de deterioração. Em projetos de estruturas, a agressividade ambiental é classificada conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

A vida útil das estruturas é diretamente associada às características do concreto. Com o intuito de obter-se a durabilidade estabelecida em projeto, os postes de concreto armado devem atender alguns requisitos mínimos, os quais, conforme a NBR 8451-1 (ABNT, 2011), devem atender ao apresentado na NBR 12655 (ABNT, 2015), que prescreve a equivalência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (TABELA 2).

Tabela 2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto em MPa (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto (Kg/m ³)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA - Componentes e elementos estruturais de concreto armado.

CP - Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2015).

De acordo com a NBR 8451-1 (ABNT, 2011), os postes de concreto armado expostos às condições especiais devem atender ao prescrito na NBR 12655 (ABNT, 2015) para a máxima relação água/cimento (a/c) e valor mínimo da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) expressas na Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,50	35 MPa
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou à agentes químicos de degelo	0,45	40 MPa
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40 MPa

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

A NBR 8451-1 (ABNT, 2011) menciona que para postes de concreto armado expostos às soluções contendo sulfatos devem atender os parâmetros prescritos pela NBR 12655 (ABNT, 2015), estabelecendo que o concreto sujeito a esse tipo de exposição, deve ser composto por cimento resistente a sulfatos e atender ao apresentado na Tabela 4, que se refere à relação a/c e à resistência característica à compressão do concreto.

Com o intuito de proteger as armaduras do concreto, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) menciona que o teor máximo de concentração de íons de cloreto presente no concreto endurecido, levando em consideração todos os componentes do concreto que contribuem para a dissipação de cloretos, não exceda os valores estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015), os quais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO₄) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO₄) presente na água (ppm)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal^a	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2	Conforme Tab. 2
Moderada ^b	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,5	35 MPa
Severa ^c	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40 MPa

^a Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

^b A água do mar

^c Para condições severas de agressividade devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: Adaptado de NBR 12655 (ABNT, 2015).

Tabela 5 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras de concreto

Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

Também, com a finalidade de proteger as armaduras do concreto, os postes precisam obedecer aos limites de absorção de água de acordo com as classes de agressividade ambiental dispostas na Tabela 6. Para postes de concreto, o ensaio de absorção de água é realizada conforme a NBR 8451-4 (ABNT, 2011).

Tabela 6 - Teores de absorção de água para postes de concreto armado

Classe de agressividade ambiental (CAA) ^a	Resultado dos corpos de prova que compõem a amostra ^b	
	Média	Individual (cada corpo de prova)
II	≤ 5,5 %	≤ 7,0 %
III	≤ 5,0 %	≤ 6,5 %
IV	≤ 4,0 %	≤ 5,5 %

^a A classe de agressividade ambiental I não se aplica a postes de concreto.

^b Para postes de concreto protendido, o índice de absorção deve ser reduzido em 0,5 % sobre todos os valores

Fonte: NBR 8451-1 (ABNT, 2011).

Quanto ao que diz respeito ao cobrimento das armaduras de postes de concreto, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) estabelece que para qualquer parte das armaduras longitudinal e transversal deve ter espessura mínima de 15 mm de cobrimento, sendo que, para postes de concreto destinados à utilização em classes de agressividade ambiental III e IV, o cobrimento da armadura deve ser de no mínimo 25 mm, e para os furos, deve ser previsto um cobrimento mínimo de 5 mm.

Em relação às extremidades da armadura longitudinal, as mesmas precisam estar situadas a 20 mm do topo e da base do poste, com tolerância de + 10 mm e – 5 mm. Para postes de concreto protendido, as extremidades dos cabos que faceiam as superfícies do concreto nas seções da base e do topo, podem ficar expostos desde que sejam devidamente protegidos por algum anticorrosivo (NBR 8451-1, ABNT, 2011).

2.3 Materiais constituintes

O concreto armado é composto por concreto convencional ou autoadensável e armaduras de aço. O concreto é caracterizado por possuir uma boa resistência à compressão, utilizado habitualmente entre 20 e 40 MPa, e por uma resistência à tração baixa, sendo normalmente dez vezes menor que a resistência à compressão. Dessa maneira, em estruturas de concreto armado, a baixa resistência à tração é aperfeiçoada com o emprego de armaduras de aço dispostas ao longo das peças (FUSCO, 2008).

Conforme Moreira (2009) é importante conhecer as propriedades dos materiais que irão compor o concreto, pois sua durabilidade dependerá diretamente do controle e da escolha correta da matéria-prima a ser utilizada.

2.3.1 Aço

O aço, quando detalhado e dimensionado de maneira adequada, atende muito bem a resistência à maioria dos tipos de solicitações impostas, principalmente quando se refere à tração no concreto armado. Mesmo em peças que são comprimidas, o aço, além de prover ductilidade, garante uma resistência maior à compressão. Quanto às nervuras e entalhes presentes nas barras, estes, são responsáveis por garantir a aderência ao concreto, harmonizando a atuação do concreto e do aço (PINHEIRO *et al*, 2003).

Nas estruturas de concreto armado são empregados aços com resistências de escoamento de 500 e 600 MPa. As armaduras são exigidas em virtude das deformações do concreto, pois elas acompanham passivamente essas deformações e, em decorrência disso são chamadas de armaduras passivas (FUSCO, 2008).

As armaduras empregadas longitudinalmente às peças são resistentes aos esforços impostos pelas forças normais e pelos momentos fletores. Já as armaduras transversais, compostas por estribos, são resistentes aos esforços provenientes de forças cisalhantes e de torção (FUSCO, 2008).

2.3.2 Concreto

O concreto é composto por uma mistura apropriada de aglomerante hidráulico (cimento), agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra britada), água, além de aditivos plastificantes ou superplastificantes e adições minerais, resultando em uma massa plástica, consistente e que endurece de acordo com o tempo de exposição (TAYLOR, 1990; BICZOK, 1968 *apud* JOUKOSKI, 2003).

Misturando o cimento à água forma-se a pasta de cimento, adicionando a areia tem-se a argamassa. Juntando a pedra britada obtém-se o concreto simples (FUSCO, 2008).

Concreto autoadensável

Para o preparo do concreto autoadensável (CAA) são utilizados praticamente os mesmos materiais do concreto convencional (CCV). Entretanto, com maior percentual de finos (adições minerais) e aditivos, estes que por sua vez podem ser plastificantes, superplastificantes ou modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Uma das diferenças do CAA em relação ao CCV é o aumento no volume de pasta e uma redução no volume de agregados. O equilíbrio entre a grande fluidez, alcançada através da utilização de aditivos, e a moderada viscosidade e coesão, obtidas pela adição de minerais de granulometria fina, auxiliam na capacidade do concreto de se autoadensar. Essas propriedades garantem um fluxo constante e uniforme da mistura, escoando com facilidade entre barras de aço e preenchendo todos os espaços da fôrma sem exibir segregação (GOMES; BARROS, 2009).

Tutikian (2007) afirma que para a construção nas últimas décadas, uma das grandes tecnologias empregadas, foi o CAA, visto que sua utilização proporciona inúmeras vantagens, como:

- Aceleração do processo produtivo, pois dispensa o adensamento;
- Um melhor acabamento da superfície das peças;
- A concretagem de peças com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- Aumento da durabilidade já que a alta fluidez do concreto evita falhas de concretagem;
- Supressão da vibração, o que reduz a emissão de barulho e mão-de-obra no canteiro, além de tornar o local de trabalho mais seguro.

2.3.2.1 Cimento Portland

É indispensável ter-se o conhecimento das características e propriedades dos variados tipos de cimento disponíveis, sendo que deve-se escolher o mais adequado para a execução de um determinado serviço ou obra. No Brasil, atualmente são produzidos cimentos Portland do tipo: comum (CP I), comum com adições (CP I-S), composto (CP II), de alto-forno (CP III), pozolânico (CP IV) e de alta resistência inicial (CP V-ARI), além daqueles fabricados com resistência à sulfatos que são inseridos nestas categorias (SOUZA; RIPPER, 2009).

Os elementos que compõem os diversos tipos de cimento Portland são praticamente os mesmos, variando as proporções em que esses componentes são adicionados. Os principais componentes são a cal (CaO), a alumina (Al_2O_3), a sílica (SiO_2) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). Estes, reagem entre si e aglomeram-se em pedaços de até 2 cm, chamados clínquer, após a exposição à elevadas temperaturas. Por fim, o clínquer é moído originando o cimento Portland (FUSCO, 2008; SOUZA; RIPPER, 2009). Segundo Botelho e Marchetti (2015), adiciona-se ainda ao clínquer, o gesso, que tem função de retardar a ação aglutinante do cimento quando umedecido.

Tutikian e Dal Molin (2008) esclarecem que para concretos autoadensáveis não existem critérios científicos que especifiquem qual o cimento mais adequado a ser utilizado, no entanto indica-se o emprego daquele que apresentar uma variabilidade menor em termos de resistência à compressão. Complementando, Helene e Terzian (1993) dizem que quanto mais fino o cimento melhor a resistência, principalmente nos primeiros dias, diminuindo assim a exsudação e segregação, aumentando a coesão e trabalhabilidade do concreto.

2.3.2.2 Agregados

A maior parte do volume do concreto é ocupada por agregados. Dessa forma, suas qualidades são de extrema importância, pois além de influenciarem na resistência do concreto, suas propriedades interferem diretamente na durabilidade e no desempenho estrutural do mesmo (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os agregados são caracterizados principalmente pela distribuição granulométrica, massa unitária e específica, módulo de finura e dimensão máxima característica (HELENE; TERZIAN, 1993). Conforme Fusco (2008), os agregados utilizados no concreto são divididos em graúdos e miúdos, dependendo da sua composição granulométrica. O agregado miúdo pode ser uma areia quartzosa ou artificial, com diâmetro máximo característico de até 4,8 mm. Já o agregado graúdo é derivado da britagem de rochas ou de pedregulho natural, com diâmetro máximo superior a 4,8 mm.

Quanto maior for a compactação do agregado miúdo utilizado na produção do concreto, maior será sua resistência e durabilidade. Ainda, o agregado possuindo um maior grau de compactação, seu volume de vazios será menor, resultando na redução de pasta de cimento requerida para envolver os grãos (SOUZA; RIPPER, 2009).

O comportamento mecânico do concreto é diretamente influenciado pela forma e textura superficial do agregado. Agregados angulosos e com superfícies rugosas apresentam melhor aderência com a pasta de cimento do que agregados arredondados e lisos, porém, sendo a angulosidade muito acentuada, ocorre o aumento de consumo de água e redução da trabalhabilidade do concreto. Portanto, principalmente para CAA, indica-se a utilização de agregados cúbicos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Conforme Gomes e Barros (2009), o agregado graúdo deve ser utilizado em baixo volume no CAA, representando 28 a 35% do volume do concreto, com proporções de 750 a 920 Kg/m³. Já o agregado miúdo representa normalmente 40 a 50% do volume de argamassa, com proporções aproximadas de 710 a 900 Kg/m³.

2.3.2.3 Água

A água, assim como o cimento, é um dos elementos mais importantes do concreto. Se utilizada em excesso, influencia na durabilidade fazendo com que a resistência do concreto sofra variações, além de aumentar a capilaridade e a permeabilidade. Se usada uma quantia insuficiente, compromete-se a trabalhabilidade do concreto (GIAMUSSO, 1992).

A água utilizada na produção do concreto deve ser livre de substâncias que possam prejudicar a mistura. Teores de sulfatos, cloretos, resíduos sólidos existentes e conteúdo de matéria orgânica devem ser devidamente controlados no caso de existência de águas não potáveis. Entretanto, pelas próprias reações de hidratação do cimento, grande parte dos agentes agressivos presentes na água de amassamento são controlados, exceto os íons de cloreto, quando estiverem com teores acima dos limites estabelecidos por norma (FUSCO, 2008).

A água para o amassamento de concreto deve atender as exigências da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

2.3.2.4 Aditivos

Com o intuito de alterar as propriedades do concreto, seja no estado fresco ou endurecido, são adicionados produtos químicos conhecidos como aditivos. No Brasil os principais tipos de aditivos utilizados no concreto são: retardadores, aceleradores, incorporadores de ar, plastificantes e superplastificantes (JOUKOSKI, 2003).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), os aditivos superplastificantes e os modificadores de viscosidade são os mais utilizados na produção do CAA.

Pensar no CAA sem a utilização de aditivo superplastificante é inevitável, pois ele é responsável pela fluidez, sendo uma das propriedades principais desse tipo de concreto. Os superplastificantes são mais empregados em concretos de alto desempenho quando é exigido baixa relação água/cimento e alta fluidez. São caracterizados por possuírem materiais que permitem reduzir grande quantidade de água e proporcionar extrema trabalhabilidade nos concretos em que são incorporados (GOMES; BARROS, 2009).

Os aditivos modificadores de viscosidade, quando acrescentados ao concreto, buscam melhorar a coesão da mistura no estado fresco, evitando a segregação e reduzindo a perda de água por exsudação (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os aditivos para concretos devem atender aos requisitos da NBR 11768 (ABNT, 2011).

2.3.2.5 Adições minerais

As adições minerais são materiais extremamente finos, sendo de origem natural ou subproduto industrial. São incorporados ao concreto com o intuito de obter-se características específicas. No concreto fresco, as adições minerais promovem melhoria na fluidez e resistência à fissuração térmica, e são capazes de eliminar a segregação e exsudação da mistura. No estado endurecido, em função da redução da porosidade propiciada pela quantidade de finos, as adições proporcionam benefícios na resistência, permeabilidade e durabilidade (GOMES; BARROS, 2009).

Consoante Tutikian e Dal Molin (2008), a adição mineral tem a capacidade de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que se desenvolve durante a hidratação do cimento Portland. Dessa reação, forma-se o silicato hidratado de cálcio (C-S-H), um composto resistente, que ocupa os poros existentes na pasta de cimento, resultando no aumento do desempenho mecânico e da durabilidade do concreto.

As adições minerais podem ser divididas em dois grupos: quimicamente ativas e sem atividade química. As adições quimicamente ativas podem ser compostas por materiais pozzolânicos e cimentantes. Os pozzolânicos, mais utilizados, são aqueles que reagem com o Ca(OH)_2 formando compostos resistentes, ou seja, necessitam do cimento Portland para atuar, podemos citar como exemplo a sílica ativa, a cinza de casca de arroz (CCA), o metacaulim e a cinza volante. Como adição mineral sem atividade química, podemos citar o fíler, material muito fino, que auxilia no efeito físico de empacotamento granulométrico e nucleação para a hidratação dos grãos de cimento, citando como exemplos a areia fina, o calcário e o pó granítico (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.3.2.5.1 Cinza de casca de arroz

De acordo com Saciloto (2005) a cinza de casca de arroz (CCA) é resultante da combustão da casca de arroz e adquire propriedades pozolânicas quando moída finamente. Os benefícios do emprego da CCA como adição mineral na produção de concreto, substituindo parte do cimento, resultam em variados benefícios:

- Produção de concretos com maior durabilidade, aumentado o tempo de vida útil das estruturas, e reduzindo a necessidade de manutenção e reconstrução das mesmas;
- Redução no consumo de cimento no concreto: diminuindo a extração da matéria-prima necessária na produção do clínquer e, conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases que causam o efeito estufa;
- Redução da poluição de solos e de rios, visto que a utilização de CCA no concreto evita o descarte desapropriado no meio ambiente.

Segundo Reginato (2014), no Brasil, a região sul destaca-se por produzir mais de 70% da demanda nacional de arroz. Desta forma, a CCA possui alta disponibilidade nessa região, sendo atrativa e viável a sua utilização no concreto como material pozolânico.

A NBR 12653 (ABNT, 2014), classifica as adições minerais de CCA como sendo um material pozolânico, definindo-as como:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (NBR 12653, ABNT, 2014, p. 2).

2.3.2.5.2 Sílica Ativa

Tutikian e Dal Molin (2008) indicam que a sílica ativa é um subproduto que resulta do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico, e possuem formato prismático e textura lisa.

Souza e Ripper (2009) caracterizam a sílica ativa como sendo um pó fino de tom cinza com características pozolânicas, de diâmetro médio de 0,2 micrometro (μm), que, devido à sua finura, atuam no concreto alterando as propriedades tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Apresentam as seguintes vantagens:

- Maiores resistências à compressão, tração, abrasão, erosão, e ataques químicos, como de sulfatos e cloretos;
- Menor porosidade, absorvidade e permeabilidade;
- Maior aderência ao concreto velho.

2.4 Características do concreto

Conforme Neville e Brooks (2013), tanto a resistência quanto a durabilidade e a estabilidade de volume, propriedades de longo prazo do concreto endurecido, são muito afetadas pela condição de adensamento. Por isso, é de extrema importância que a trabalhabilidade ou a consistência do concreto no estado fresco seja adequada ao transporte, lançamento, adensamento e acabamento de maneira fácil e tranquila, sem sofrer segregação e exsudação, o que pode prejudicar o correto adensamento do concreto.

2.4.1 Concreto no estado fresco

As propriedades do concreto no estado fresco definem o seu comportamento na fase de moldagem e produção do pré-fabricado, assim como sua qualidade (MOREIRA, 2009).

2.4.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade, característica do concreto no estado fresco, é determinada pela facilidade com que ele pode ser produzido, transportado e adensado. Duas

propriedades do concreto atreladas à trabalhabilidade são a consistência e a coesão (MOREIRA, 2009).

Considera-se trabalhável o concreto que apresenta consistência e máximas dimensões dos agregados adequadas à obra a que se destina, considerando o tamanho das peças, bem como a distribuição e o afastamento das barras de aço. Dessa forma, a trabalhabilidade depende especialmente das condições de aplicação do concreto (RODRIGUES, 2017).

2.4.1.1.1 Consistência

A consistência do concreto no estado fresco é a facilidade ou a resistência com que ele flui. Por isso, é caracterizada pela umidade da mistura, pois concretos com quantidades maiores de água possuem mais plasticidade e trabalhabilidade do que concretos secos. Porém, concretos com mesma consistência são capazes de apresentar trabalhabilidades distintas, devido à granulometria dos agregados utilizados na composição, visto que quanto mais finos os materiais, maior a demanda de água (NEVILLE; BROOKS, 2013; GIAMMUSSO, 1992).

Quanto maior for a plasticidade da consistência da mistura, mais facilidade o concreto terá em moldar-se e deslizar-se entre as armaduras, sem que haja separação dos seus materiais constituintes. A consistência aceitável do concreto dependerá das características da obra e a disposição das barras de aço presentes nas peças (RODRIGUES, 2017).

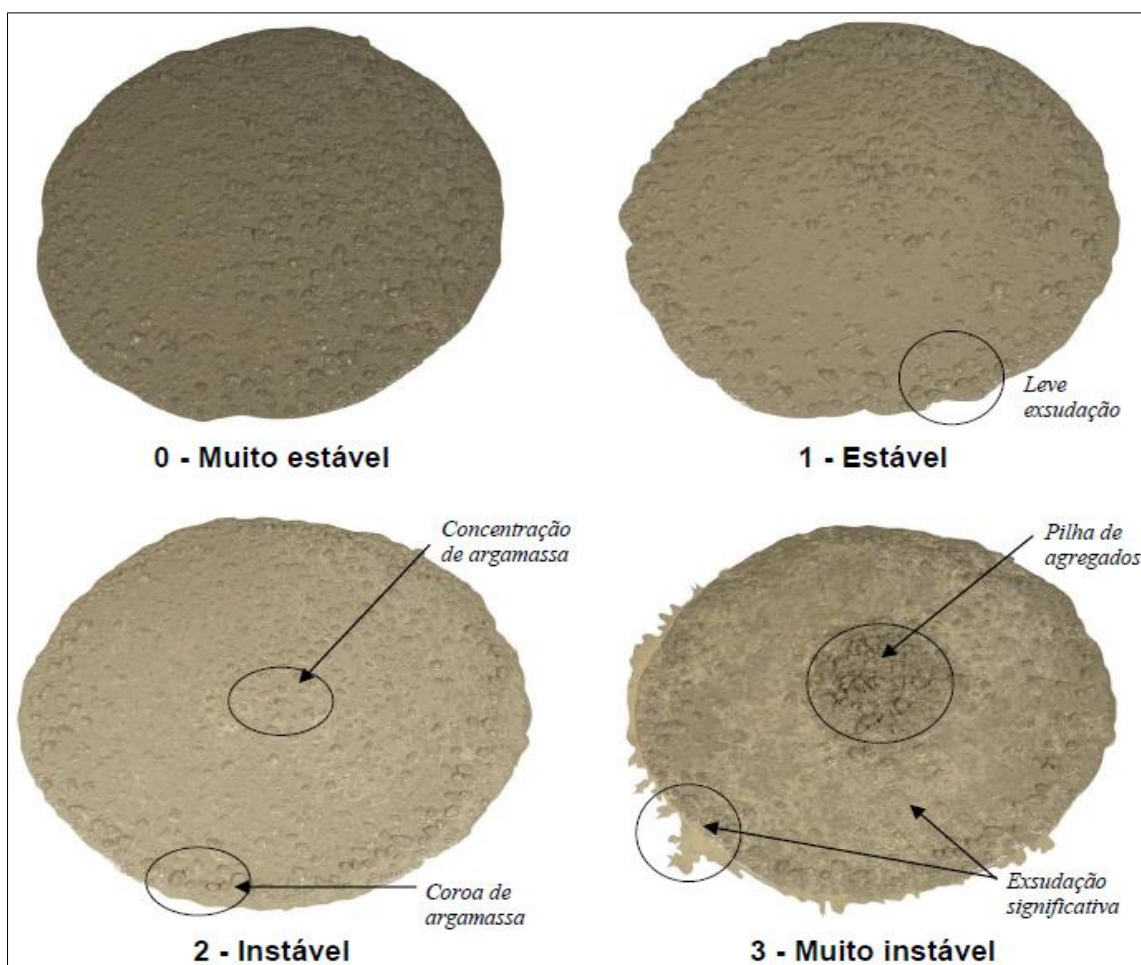
2.4.1.1.2 Coesão

A coesão caracteriza-se por manter os concretos misturados e homogêneos, sem haver separação de materiais. Na prática, para avaliar se um concreto é coeso, são observados alguns aspectos, como por exemplo, os agregados não podem apresentar um aspecto limpo ou lavado após o lançamento em fôrmas, e a água ou a pasta de cimento não podem separar-se do restante dos materiais (GIAMMUSSO, 1992).

Para Neville e Brooks (2013), o concreto coeso caracteriza-se por não apresentar segregação nem exsudação. Na primeira, ocorre a separação dos materiais fazendo com que a mistura não seja mais uniforme, sendo correlacionada com a diferença entre as dimensões dos materiais utilizados. Já na exsudação, que na verdade é uma forma de segregação, há uma tendência de que a água da mistura migre para a superfície do concreto lançado recentemente, que pode ser causada principalmente pelo excesso de água.

Na Figura 3 é possível realizar uma avaliação visual da coesão de traços de concreto autoadensável. As amostras 0 e 1 são consideradas estáveis, estando nos conformes. Na amostra 2 observa-se leve segregação (separação dos materiais) com formação de coroa de argamassa. Já a amostra 3 apresenta significativa segregação e exsudação do concreto, sendo instável e imprópria para uso (RMCAO, 2009).

Figura 3 - Análise visual da coesão de amostras de concreto autoadensável



Fonte: Adaptado de RMCAO (2009).

Quanto maior o teor de finos no concreto (cimento e agregado miúdo), maior será a coesão do concreto. Caso contrário, a mistura não será capaz de aglutinar e fechar os espaços vazios gerados pelos agregados graúdos (GIAMMUSSO, 1992).

2.4.1.2 Ensaios para avaliar a trabalhabilidade do CAA

Segundo Tutikian (2004), para avaliar a trabalhabilidade do CAA, três propriedades são fundamentais: fluidez, disposição para fluir de forma coesa e íntegra entre obstáculos e resistência à segregação. Não existe apenas um equipamento para medir todos os requisitos solicitados. Para tanto, pode-se citar o *Slump Flow Test* para avaliar a fluidez e coesão, e o *L-Box Test*, também utilizado para analisar a coesão, mas principalmente a habilidade passante do concreto.

O *Slump Flow Test* é descrito pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e o *L-Box Test* pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017).

2.4.2 Concreto no estado endurecido

No concreto endurecido, normalmente considera-se a resistência como sendo a propriedade de maior autoridade, porém, em situações específicas, outras características se tornam mais importantes, como a durabilidade e a impermeabilidade. Entretanto, por estar atrelada à estrutura da pasta de cimento, a resistência habitualmente proporciona um conceito de qualidade do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para Tutikian (2007), no estado endurecido do concreto, as propriedades mecânicas e de durabilidade resultam, basicamente, das escolhas realizadas na dosagem e mistura dos materiais. Se houver uma alta dosagem de cimento no traço, o concreto irá apresentar fissuras devido ao elevado calor de hidratação. Se o aditivo superplastificante for dosado em excesso, a pega inicial será retardada. Contudo, independente da mistura, seja ela um CAA ou um CCV, todas que são compostas por cimento Portland devem ser dosadas com cuidado para que futuramente não ocorram manifestações patológicas.

2.4.2.1 Resistência à compressão

A dosagem de concretos tem por finalidade propiciar ao concreto produzido uma resistência à compressão pré-determinada. Propriedade que é iniciada aproximadamente 2 horas após a moldagem do concreto, prazo em que a estrutura interna da mistura inicia o seu processo de solidificação. A resistência do concreto pode variar de acordo com os lotes fabricados, dependendo dos materiais e das condições empregadas em sua mistura (FUSCO, 2008).

Segundo Helene (1992) *apud* Moreira (2009):

[...] a resistência à compressão é a medida da tensão máxima necessária para romper (esmagar ou fraturar) o material. O concreto resiste muito bem a esforços de compressão, sendo tal resistência especificada pelo projetista estrutural. A resistência e a durabilidade estão intimamente associadas constituindo-se nas qualidades mais desejadas de um concreto (HELENE, 1992 *apud* MOREIRA, 2009, p. 21).

A resistência à compressão, característica qualitativa do concreto, é avaliada através de ensaio padronizado, no qual empregam-se corpos de provas cilíndricos. O ensaio para representar o valor característico à compressão (f_{ck}) deve ser executado na idade de 28 dias do concreto. O resultado se torna referência para todas as determinações que dizem respeito à resistência do concreto especificadas em projeto. Porém, posteriormente aos 28 dias de idade, a resistência do concreto continua aumentando até ocorrer a hidratação total do cimento, esse ganho é de 20 a 25% (FUSCO, 2008).

A moldagem e o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos devem atender aos requisitos estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2016) e pela NBR 5739 (ABNT, 2007).

2.4.2.2 Durabilidade do concreto

A durabilidade do concreto das estruturas é relativa aos materiais utilizados em sua fabricação e à capacidade de resistir à agressividade do meio em que está inserida. Os mecanismos de agressão podem ser de natureza física ou química, e

dependem da disponibilidade de oxigênio no ar e de água no interior da estrutura, assim como a presença de fatores que realizam o transporte de agentes agressivos pelas fissuras e poros do concreto (FUSCO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a durabilidade e os mecanismos de condução de agentes agressivos são relacionados com a pasta de cimento, zona de transição entre o agregado e a pasta, e também em função da porosidade e da ligação dos poros do concreto. Ainda segundo os autores, a principal característica responsável pela passagem de fluídos por meio da estrutura é realizada pelos poros capilares, que funcionam como meios de entrada e saída de água da estrutura de concreto.

A água está totalmente relacionada à durabilidade das estruturas de concreto. A quantidade de água presente no concreto e sua relação com o cimento irá dirigir as características como porosidade, densidade, capilaridade, permeabilidade e resistência mecânica, que são as principais referências para a obtenção de um concreto de qualidade (SOUZA; RIPPER, 1998).

2.4.2.2.1 Porosidade

De acordo com Kopsch (2001), a porosidade, inserida no interior da estrutura do concreto, é formada por espaços vazios ou pequenos poros, distintos pela sua forma, volume, área específica, distribuição e ligação entre si, em que o volume total é uma questão essencial para avaliar as propriedades do concreto no estado endurecido.

Consoante Joukoski (2003), a quantidade e o volume dos poros dependem da relação água/cimento da pasta. Quanto maior o fator a/c, maior o percentual de poros. O autor também ressalta que a entrada de substâncias agressivas no interior da estrutura é muito influenciada pela quantidade de poros, pois quanto mais poros houver, menos resistente será o concreto.

2.4.2.2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é a capacidade que o concreto possui de permitir que fluidos e gases movimentam-se em seu interior. Essa propriedade é de suma importância para a estanqueidade de estruturas que são expostas ou que permanecem em contato com líquidos agressivos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A presença de fissuras ou de outras imperfeições geradas por retração, exsudação ou expansão térmica, são propriedades que modificam a porosidade do concreto e, por consequência, a sua permeabilidade, afetando a resistência e durabilidade da estrutura. A permeabilidade é o mecanismo principal de condução de agentes agressivos para o interior do concreto (SACILOTO, 2005).

Um concreto com alta relação a/c e grau de hidratação baixo, resulta consequentemente em uma porosidade capilar alta. Dessa maneira, a estrutura do concreto será composta por grandes poros, bem conectados entre si, evidenciando um grande coeficiente de permeabilidade. Entretanto, se a hidratação do concreto ainda estiver em desenvolvimento, grande parte dos poros terão seus tamanhos reduzidos resultando na redução da permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.4.2.2.3 Absorção de água por capilaridade e imersão

De acordo com Helene e Terzian (1992), a capilaridade é o mecanismo em que elementos líquidos podem ser conduzidos pelo concreto por meio de poros, dados em função de uma tensão superficial exclusiva de cada fluido. O acesso da água por capilaridade varia de acordo com a sua densidade, tensão superficial e viscosidade, assim como as propriedades do concreto, como sua porosidade e teor de umidade. A absorção decorrida pela capilaridade não ocorre em concretos já saturados, apenas em concretos com poros secos ou parcialmente secos. Ainda, segundo estudos realizados pelos autores, concretos com baixa relação água/cimento possuem poros com diâmetros menores sendo menos comunicáveis, consequentemente resultando em quantidade absorvida e altura de ascensão, menores.

Saciloto (2005) explica que, a água da chuva ao atingir a superfície de uma estrutura impregnada por cloretos, carregará para o interior da peça, através de absorção capilar, sais dissolvidos, os quais, com o passar do tempo poderão provocar a corrosão da armadura, e em seguida a degradação da estrutura.

O método para determinação da absorção por meio de ascensão capilar é estabelecida pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

Para determinar a absorção de água por imersão em postes, utiliza-se a NBR 8451-4 (ABNT, 2011). Já para o restante das estruturas de concreto emprega-se a NBR 9778 (ABNT, 2005), que também prescreve o ensaio de índice de vazios, que atua segundo a norma: “Relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra” (NBR 9778, ABNT, 2005, p.1).

Conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), a absorção de água por imersão é o:

[...] processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. [...] é também o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco (NBR 9778, ABNT, 2005, p.1).

Concretos com absorção de água inferior a 4,5% e índice de vazios menor que 11%, são considerados duráveis em ambientes marinhos segundo Lacerda e Helene (2003), seguindo-se os requisitos da ASTM C 642 (2013).

2.4.3 Agentes agressivos

Em função do meio em que estão inseridas, as estruturas de concreto sofrem deterioração por várias formas, como: secagem pela ação do sol e do vento, chuva ácida, ação de cloretos e sulfatos de ambientes marinhos, entre outros, sendo que a duração e intensidade de exposição à elas serão determinantes para a durabilidade da estrutura. Dessa forma, os agentes agressivos transportados para parte interna do concreto, seja por absorção, permeabilidade ou difusão, são, na maioria dos casos, responsáveis pela degradação das estruturas de concreto (SACILOTO, 2005).

A redução de durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser determinada por agentes externos presentes no ambiente ou por agentes internos já presentes no concreto. As causas podem ser de natureza física, química e mecânica. A ação do congelamento e as diferenças entre as propriedades dos agregados com a pasta de cimento são originados por agentes físicos, já as causas mecânicas são relacionadas à abrasão. As causas de natureza química são associadas à ataques por sulfatos, cloretos, ácidos e água do mar, os quais resultam em corrosão da armadura, devido à penetração desses agentes agressivos ao interior da estrutura de concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.4.3.1 Corrosão das armaduras

Segundo Fusco (2008), as armaduras de aço presentes no concreto estão inseridas em um meio alcalino, com potencial Hidrogeniônico (pH) na casa dos 13. Dessa forma, para que as armaduras sofram corrosão, é preciso que elas entrem em contato com a umidade e o oxigênio. Se o concreto estiver inserido em um meio totalmente seco ou saturado, não ocorrerá a corrosão da armadura.

A perspectiva de que a corrosão do aço não ocorra, ou seja menos provável, em situações onde a estrutura é protegida do ar por uma espessura de revestimento apropriada na qual o concreto apresente baixa permeabilidade. Porém, quando ocorre a corrosão da armadura, as avarias no concreto manifestam-se por meio da expansão e fissuração seguido de fragmentação do revestimento de concreto. A estrutura, além de sofrer perda de revestimento, não perde apenas a aderência entre o concreto e o aço, mas também a área de seção transversal da barra, podendo levar o elemento estrutural ao colapso (METHA; MONTEIRO, 2014).

O caráter fortemente alcalino do Ca(OH)_2 , age prevenindo a corrosão da armadura, pois forma uma pequena camada protetora na superfície do aço, conhecida como passivação. Porém, se o concreto for muito permeável, e existindo a presença de água e oxigênio, o processo de penetração de cloretos será facilitado, iniciando assim a corrosão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.4.3.2 Ataque por cloretos

O íon de cloreto (Cl^-) é considerado um dos elementos mais agressivos, pois pode deteriorar o concreto e causar a corrosão da armadura de estruturas localizadas em ambientes litorâneos. Em função das características químicas da água do mar, determinadas pela dissolução salina, a atmosfera marinha oferece a maior agressividade de exposição para uma estrutura de concreto armado. Os sais presentes na água são facilmente conduzidos para grandes distâncias por meio de respingos ou pela maresia, e tornam a água um excelente eletrólito, que auxilia o processo de corrosão eletroquímica (KOPSCH, 2001).

Os íons de cloreto, advindos de poluentes ambientais ou da água do mar, através da difusão da água contida em poros saturados, penetram no interior da massa de concreto. Assim, os cloretos que possuem a capacidade de anular a película protetora de óxido de ferro presente na superfície das armaduras, provocam o início da corrosão das mesmas (FUSCO, 2008).

A difusão de cloretos em um concreto é um parâmetro relevante, que comumente é relacionada com a resistência do concreto à penetração. A relação água/aglomerante reflete diretamente na porosidade do concreto, variando a resistência à penetração. Contudo, após experiências realizadas, a utilização de materiais cimentícios adicionais no concreto, como a sílica ativa e cinzas volantes, reduzem a difusividade do cloreto no concreto se comparado à outra mistura de mesma relação água/aglomerante, porém utilizando apenas o cimento Portland (FIGUEIREDO; HELENE, 2015).

O fenômeno de transporte de cloretos é muito complexo, e dependendo das condições, pode ser realizado por combinações entre três mecanismos: permeabilidade, absorção e difusão. A principal característica por trás da permeabilidade é a presença de um gradiente de pressão. Na absorção, as soluções de cloretos são transportadas por sucção capilar por meio de um concreto não saturado. A difusão, mecanismo de transporte mais estudado, ocorre quando o concreto já saturado é exposto a uma solução contendo cloretos (COSTA, 2015).

Para medir os coeficientes de difusão de cloretos presentes no concreto, existem dois tipos de ensaios de penetração normalmente empregados, conhecidos como: teste de difusão em estado estacionário e não estacionário. O primeiro, no qual é adotado a primeira Lei de Fick (EQUAÇÃO 1) para determinar o coeficiente de difusão, consiste em medir periodicamente o teor de cloretos presente em uma amostra de concreto exposta em meio a duas células, uma contendo solução de cloretos e a outra isenta de cloretos. No segundo experimento, calculado conforme a segunda Lei de Fick (EQUAÇÃO 2), as amostras de concreto são imersas em uma solução contendo íons de cloreto durante um determinado período, e posteriormente são medidas as alturas de penetrações de cloretos. As amostras são lateralmente vedadas com o intuito de que o fluxo ocorra de forma unidirecional (SAVAS, 1999; BASHEER *et al.*, 2001; SHI *et al.*, 2012 *apud* COSTA, 2015).

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

Onde:

F = fluxo de massa (kg/m².s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

C = concentração (g/m³);

x = distância (m).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

Onde:

D = coeficiente de difusão (m²/s);

C = concentração (g/m³) determinado a partir da Equação 3;

x = distância (m);

t = tempo.

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (3)$$

Onde:

C = concentração de cloretos na profundidade x no tempo t (kg/m³);

C_0 = concentração inicial de cloretos no concreto (kg/m³);

erf = função erro de Gauss;

x = profundidade da medição de cloretos (m);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

t = tempo de exposição.

Para analisar o ingresso de cloretos nos concretos através de teste de difusão em estado estacionário pode-se citar a norma americana ASTM C 1202 (2017), método que apresenta vantagens por apresentar rapidez na obtenção de resultados e ser de fácil execução. O ensaio possui um tempo de duração de aproximadamente 6 horas no qual mede-se a carga elétrica passante pela amostra. Para testes de difusão de cloretos em estado não estacionário, cita-se o ensaio proposto pela norma britânica BS EN 12390-11 (2015), que necessita de 90 dias pós cura e condicionamento do concreto para realização do ensaio e como resultado obtém-se a concentração de cloretos.

3 METODOLOGIA

A partir de um traço de concreto atualmente empregado por uma empresa fabricante de postes de concreto armado da cidade de Teutônia/RS, tem-se o objetivo de adequar a mistura utilizada para que atenda aos requisitos exigidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) para a classe de agressividade ambiental III. Assim, procura-se determinar o melhor custo-benefício dentre os traços estudados, levando em consideração apenas o valor comercial dos materiais utilizados, e adequar as misturas às exigências de desempenho em relação a durabilidade, substituindo parte do cimento por adições minerais de cinza de casca de arroz e sílica ativa.

Foram realizados 5 traços de concreto autoadensável. Um traço sendo o de referência, similar ao utilizado pela empresa atualmente, porém, com uma quantia de cimento maior por metro cúbico, em função de que os traços com emprego de 20% de adição mineral, ficariam com a quantia de cimento abaixo de 320 kg, mínimo exigido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para a CAA III. Os outros quatro traços são compostos por adições de sílica ativa e CCA, com 10 e 20% de substituição em relação à massa do cimento. Estes percentuais de adições minerais utilizados foram baseados em estudos realizados por Hoffmann (2001), Possan (2004), Reginato (2014) e Saciloto (2005), nos quais foram verificados que substituições de 10 a 20% em relação a massa do cimento obtiveram melhores resultados em relação à durabilidade e resistência do concreto. Na Tabela 7 estão as nomenclaturas que foram utilizadas para designar cada traço.

Para a pesquisa foram moldados um total de 105 corpos de prova, equivalendo a 21 para cada traço analisado, sendo necessários no mínimo 33 litros de concreto por traço, visto que um corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm é preenchido por 1,57 litros de concreto.

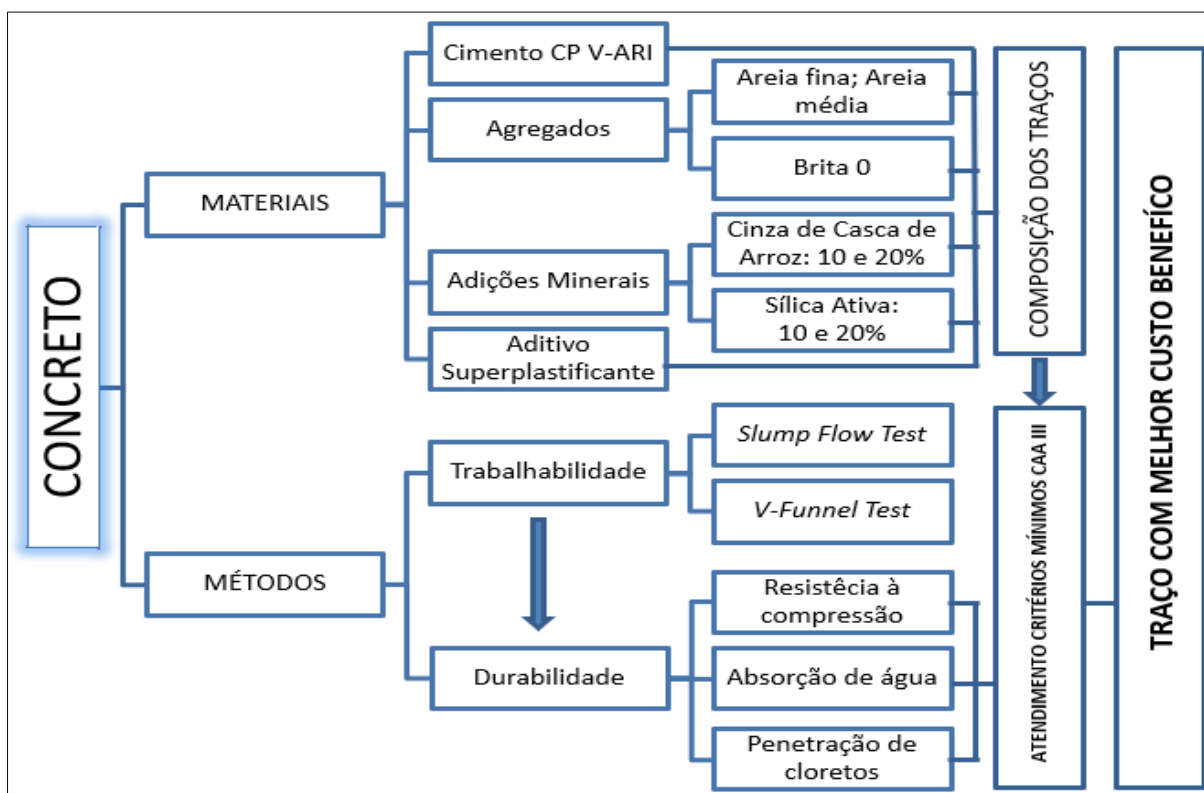
Tabela 7 - Nomenclatura dos traços

Designação	Código
Traço Referência	T-REF
Traço com adição de 10% de CCA	T-10CCA
Traço com adição de 20% de CCA	T-20CCA
Traço com adição de 10% de Sílica Ativa	T-10SA
Traço com adição de 20% de Sílica Ativa	T-20SA

Fonte: Autor (2017).

Portanto, os traços de concreto foram avaliados no estado fresco pela trabalhabilidade e em estado endurecido através de ensaios de compressão axial, absorção de água e penetração de cloretos. Na Figura 4 é possível analisar os materiais e métodos empregados no estudo.

Figura 4 - Fluxograma dos materiais e métodos que serão empregados



Fonte: Autor (2018).

A seguir apresenta-se os materiais e métodos utilizados para realizar os comparativos entre os traços que foram empregados.

3.1 Materiais

Segundo Moreira (2009), é extremamente importante ter o conhecimento das propriedades dos materiais constituintes do concreto empregado na fabricação de estruturas pré-moldadas, visto que influenciam diretamente na qualidade do concreto produzido e na durabilidade das estruturas.

O concreto utilizado na empresa atualmente é autoadensável e composto por cimento CP V-ARI, areia média e fina, brita 0, aditivo superplastificante e água. A quantidade de cimento por metro cúbico atualmente utilizado é de 378 quilogramas, a relação a/c é de 0,65, o percentual de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento é de 0,6% para atingir um espalhamento de *Slump Flow Test* de 680 mm, sendo 60% o teor de argamassa. As proporções do traço utilizado encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Proporções do traço atualmente utilizado pela empresa

Quantidade de material (kg/m³)					
Cimento	Areia média	Areia fina	Brita 0	Água	Aditivo Sup.
378,49	535,08	362,52	849,51	246,46	2,27

Fonte: Autor (2018).

Pelo fato de que para a CAA III a quantidade mínima de cimento exigida seja de 320 kg/m³, o traço original teve que ser alterado para a aplicação do experimento, pois os traços com adição mineral de 20% ficariam com a quantia de cimento inferior ao exigido por norma. Desta forma, o traço referência para os ensaios pode ser analisado na Tabela 9.

Tabela 9 - Proporções do traço referência adotado para a pesquisa

Quantidade de material (kg/m³)					
Cimento	Areia média	Areia fina	Brita 0	Água	Aditivo Sup.
405,34	551,57	389,95	849,16	220,63	-

Fonte: Autor (2018).

Em virtude da modificação no traço, o teor de argamassa foi alterado para 61% e a quantia de aglomerante por metro cúbico para 405 kg/m³. A quantidade de aditivo superplastificante para os traço referência foi variável de acordo com as propriedades dos materiais que compõem o traço.

3.1.1 Descrição dos materiais

O cimento utilizado é do tipo CP V-ARI (alta resistência inicial), que é utilizado pela empresa devido ao curto tempo de moldagem e desforma. O cimento é da marca Votorantim, oriundo da cidade de Rio Branco no Paraná. Já os agregados miúdos utilizados na composição do concreto são a areia fina e a areia média extraída do Rio Jacuí, com jazidas localizadas nas cidades de Taquari/RS e Triunfo/RS, respectivamente. O agregado graúdo utilizado é a brita 0, oriunda de basalto britado com extração na cidade de Montenegro/RS. Na Figura 5 pode-se ver amostras dos agregados que foram utilizados.

Figura 5 - Amostra dos agregados



Fonte: Autor (2017).

As adições minerais de CCA e sílica ativa foram disponibilizadas pelo Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Univates. A CCA foi escolhida devido a maior disponibilidade no estado, em relação às outras adições, e a sílica ativa pelos bons resultados obtidos na utilização em outros trabalhos. Para o presente estudo, objetiva-se utilizar para os traços uma relação água/aglomerante de 0,54, visto que o máximo permitido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para a CAA III é de 0,55.

A água de amassamento utilizada é potável, sendo a mesma usada no LATEC. O aditivo empregado foi o Reoplast PCE 650 da marca Builder, caracterizado por ser um aditivo superplastificante de alto desempenho a base de policarboxilatos, de aspecto líquido e cor amarelo claro com pH de 5 a 7.

3.1.2 Ensaios de caracterização dos materiais

Para a caracterização dos materiais utilizados foram realizados os ensaios a seguir descritos.

- **Análise granulométrica:** com a distribuição granulométrica, determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) por peneiramento, definiu-se o módulo de finura, a dimensão máxima característica (DMC) e os valores para criar-se a curva granulométrica dos agregados miúdos (areia média e fina) e do agregado graúdo (brita 0). De acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), a areia média e a brita 0 ficaram dentro do aceitável, sendo que, para o agregado miúdo o módulo de finura da areia deve estar compreendido entre 2,20 e 2,90 na zona ótima de utilização, e para o agregado graúdo a norma aceita um desvio de 5% em um dos limites de cada zona granulométrica. A areia fina, por possuir baixo módulo de finura, ficou abaixo dos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), porém, sua utilização na mistura é interessante, visto que os materiais finos auxiliam no aumento de coesão do concreto dando melhor acabamento às peças moldadas;

- Determinação da massa específica e unitária: a massa específica dos materiais, necessária para o cálculo de dosagem, foi determinada pela NBR NM 52 (ABNT, 2009) para os agregados miúdos, pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) para o agregado graúdo e pela NBR 16605 (ABNT, 2017) para o cimento, sílica ativa e CCA. Para os agregados graúdos e miúdos, também foi definida a massa unitária, conforme o que preconiza a NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Material pulverulento: realizou-se o ensaio conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003) para os agregados, determinando por lavagem o percentual de material fino que passa através da peneira 75 μm . Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que a NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica que a quantidade máxima relativa à massa do agregado seja de 1% para o agregado graúdo, e 3% para o agregado miúdo.

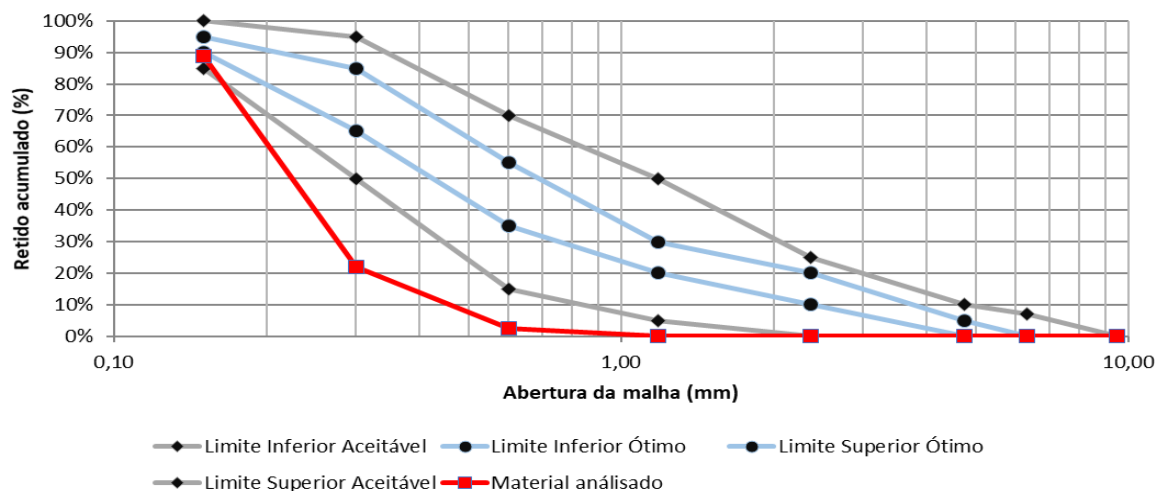
Para que fosse possível o cálculo de dosagem, as propriedades dos materiais empregados estão discriminadas na Tabela 10, as quais foram determinadas de acordo com as normas citadas. As curvas granulométricas dos agregados podem ser observadas nas Figuras 6, 7 e 8.

Tabela 10 - Propriedades dos materiais empregados nas dosagens

Material	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Módulo de finura	DMC (mm)	Material pulverulento (%)
Cimento	3,07	-	-	-	-
CCA	2,15	-	-	-	-
Silica Ativa	2,18	-	-	-	-
Areia Fina	2,45	1,41	1,13	0,60	1,10
Areia Média	2,74	1,52	2,53	2,36	1,70
Brita 0	2,96	1,47	6,04	12,50	0,80

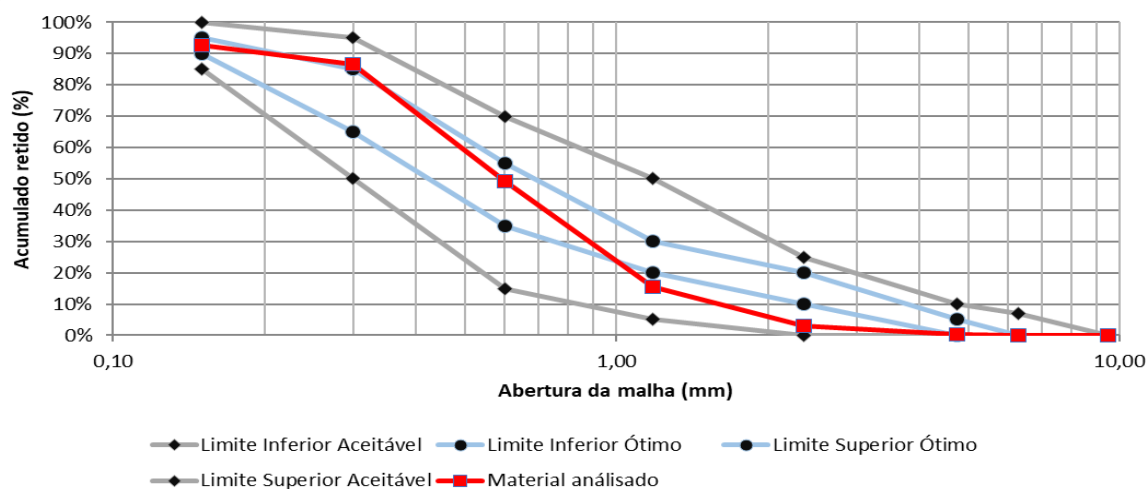
Fonte: Autor (2018).

Figura 6 - Curva granulométrica da areia fina



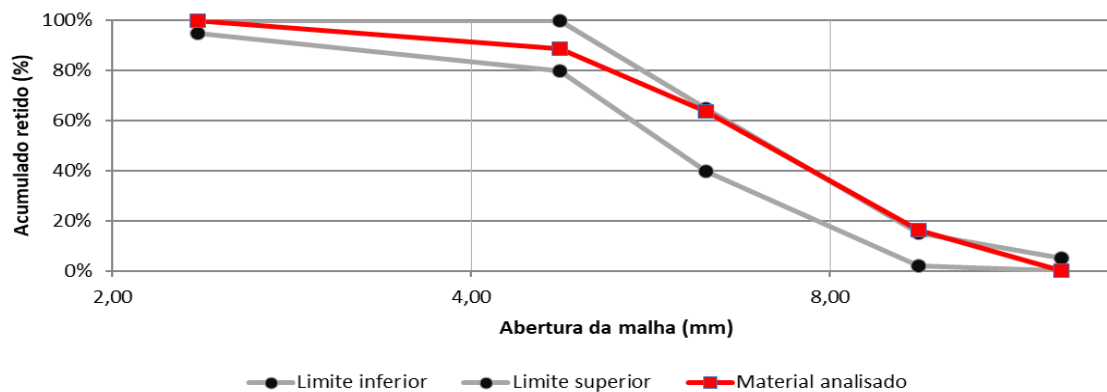
Fonte: Autor (2018).

Figura 7 - Curva granulométrica da areia média



Fonte: Autor (2018).

Figura 8 - Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Autor (2018).

3.2 Métodos

Com o intuito de analisar o comportamento do concreto no estado fresco e no estado endurecido, foram utilizados os métodos e ensaios descritos a seguir. Todos realizados no LATEC.

3.2.1 Controle de trabalhabilidade

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), para verificar a trabalhabilidade do CAA se faz necessária a medição de três propriedades: fluidez, resistência à segregação e a capacidade de fluir coeso e íntegro entre obstáculos. Dessa forma, foram adotados dois métodos para a verificação da trabalhabilidade do concreto: *Slump Flow Test* e o *L-Box Test*.

3.2.1.1 Método do cone de Abrams - *Slump Flow Test*

O *Slump Flow Test* foi realizado de acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2017) que prescreve que o ensaio é empregado para avaliar a capacidade do CAA de fluir livremente sem segregar.

Para a realização do ensaio fez-se necessário a utilização de um cone de Abrams, em formato tronco cônico com 300 mm de altura, com as extremidades abertas e diâmetros internos medindo 200 e 100 mm, seguindo os requisitos da NBR NM 67 (ABNT, 1998). Para o apoio do molde cônico, foi utilizada uma chapa metálica quadrada de 900 mm de lado.

Inicialmente, tanto o cone quanto a placa devem ser umedecidos para que não absorvam a água do concreto durante o ensaio. O molde, fixado através de suas aletas pelos pés do operador, deve ser posicionado no centro da placa, que deve ficar sobre uma superfície nivelada. O preenchimento do cone auxiliado por um recipiente que não absorva a umidade do concreto deve ser realizado sem adensar o concreto. Em seguida, deve ser retirado o excesso de material da superfície e o molde levantado com cuidado na direção vertical. Obtém-se o resultado do ensaio

por meio de média aritmética de duas medições do diâmetro, realizadas perpendicularmente uma da outra, e expressa em milímetros com o auxílio de uma régua metálica de 1000 mm, graduada. Na Figura 9 observa-se parte do ensaio.

Figura 9 - *Slump Flow Test*



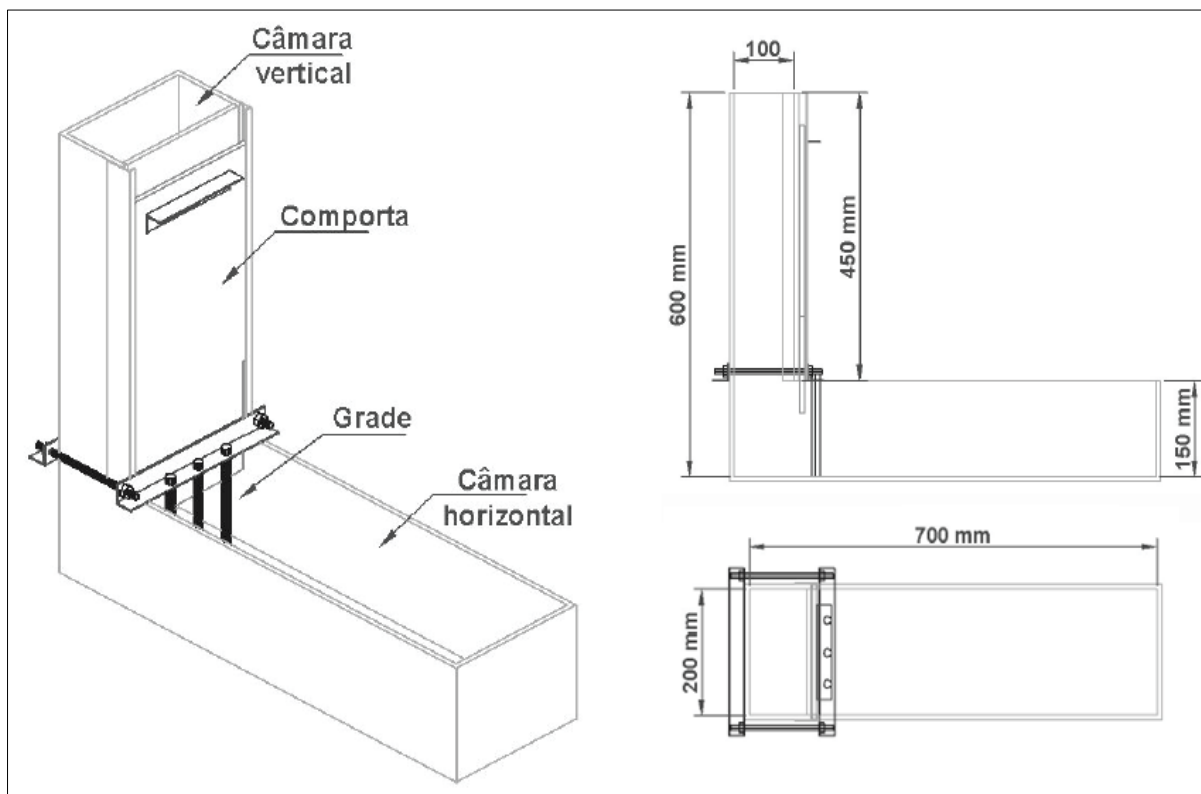
Fonte: Autor (2017).

3.2.1.2 Método da caixa L - *L-Box Test*

O *L-Box Test* foi realizado conforme a NBR 15823-4 (ABNT, 2017) que prescreve que o ensaio é utilizado para determinar a capacidade do CAA de passar por obstáculos e permanecer coeso.

Para a execução do ensaio é necessária uma caixa metálica em forma de L, com detalhes e dimensões apresentados na Figura 10. A caixa deve conter uma grade com duas ou três barras metálicas lisas (diâmetro de 12,5 mm), posicionadas verticalmente e espaçadas igualmente entre si e em relação às laterais da caixa. A quantidade de barras depende da dimensão máxima do agregado graúdo.

Figura 10 - Detalhes e dimensões da caixa L

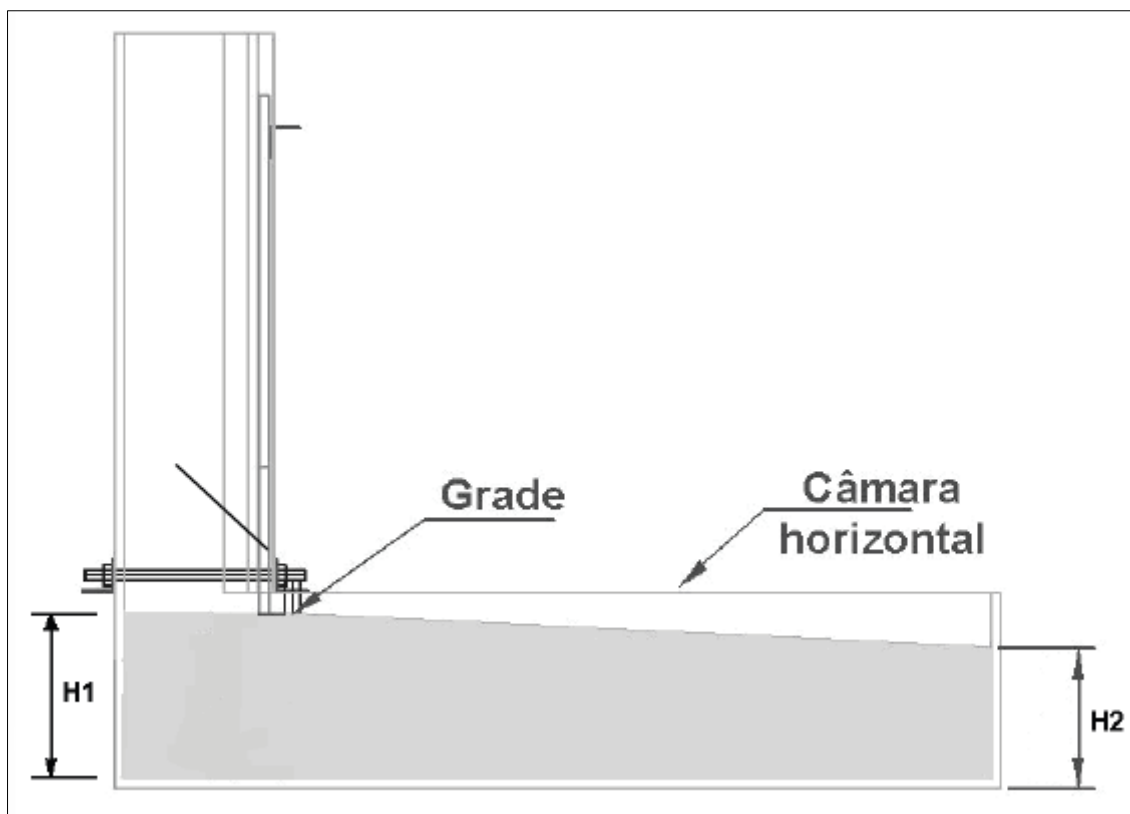


Fonte: Adaptado da NBR 8451-4 (ABNT, 2017).

Segundo a norma, para iniciar o ensaio, a caixa L deve ser umedecida com água, estar disposta sobre uma superfície plana e sua comporta devidamente fechada. Em seguida, a câmara vertical precisa ser totalmente preenchida de concreto com o auxílio de um balde com material que não absorva umidade. Não deve ser feito adensamento. Com uma colher de pedreiro, o excesso de material na superfície é retirado. Depois de 30 a 60 segundos do preenchimento da câmara, a comporta deve ser aberta rapidamente, sem interrupções, permitindo que o concreto escoe pela câmara horizontal. O resultado é obtido ao final do escoamento, medindo as alturas H_1 e H_2 , conforme a Figura 11, e calculando a habilidade passante (HP) por meio da Equação 4.

$$HP = \frac{H_2}{H_1} \quad (4)$$

Figura 11 - Indicativo das alturas H1 e H2



Fonte: NBR 15823-4 (ABNT, 2017).

Para a presente pesquisa, a grade da caixa L foi composta por três barras de aço, que segundo a NBR 15823-4 (ABNT, 2017), adequa-se para elementos estruturais com espaçamento de armadura entre 60 a 80 mm.

3.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade mecânica utilizada como referência para a avaliação do concreto. Com o objetivo de comparar a resistência característica dos traços de CAA realizados, foram moldados 15 corpos de prova (CPs) cilíndricos (com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm) para cada mistura, sendo rompidos 3 CPs por idade. A moldagem seguiu as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Foram realizados ensaios de compressão axial seguindo os requisitos da NBR 5739 (ABNT, 2007), com idades de 24 horas (tempo aproximado da desmoldagem das peças pré-fabricadas sem utilização de vapor), 7 dias (período mínimo de cura exigido pelas empresas antes da entrega), 14 dias, 28 dias (determinação da resistência característica) e 91 dias, assim gerando dados para avaliar e confirmar a resistência dos traços de concreto estudados.

Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida até a idade de ensaio e a preparação das bases foi realizada através de retifica, seguindo as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Os ensaios de compressão axial foram executados no LATEC, o qual possui uma máquina de ensaio de classe 1 (FIGURA 12) que é programada para aplicar uma tensão na velocidade de 0,45 MPa, atendendo as exigências da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Figura 12 - Máquina de ensaio para rompimento de corpos de prova



Fonte: Autor (2017).

3.2.3 Absorção de água por imersão

A absorção de água, adotada como requisito de durabilidade pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), é estabelecida pela NBR 8451-4 (ABNT, 2011) para postes de concreto armado. Porém, para o presente estudo, adotou-se o ensaio prescrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005), pelo fato da NBR 8451-4 (ABNT, 2011) exigir que os corpos de prova sejam extraídos do próprio poste, tornando-se inviável a aplicação, uma vez que não foram desenvolvidos protótipos, apenas moldados corpos de prova a partir dos traços de concreto analisados.

Seguindo os preceitos da NBR 9778 (ABNT, 2005), para o ensaio de absorção de água moldou-se dois corpos de prova cilíndricos (10 cm por 20 cm) para cada traço de concreto analisado. A moldagem seguiu as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), inicialmente, após os 28 dias de cura úmida, as amostras são colocadas em estufa durante 72 horas e expostas a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ para determinar a massa seca (m_s). Posteriormente, é realizada a saturação das amostras imergindo-as em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 72 horas. Em situações especiais, os dois procedimentos acima descritos podem ser encurtados, realizando pesagens, com intervalos de 24 horas, nos quais em duas averiguações sucessivas a massa da amostra não difira mais que 0,5% em relação a menor.

Após a etapa de saturação, as amostras devem ser colocadas em um recipiente cheio de água, o qual deve ser levado à ebulição entre 15 e 30 minutos e ser mantido por um período de 5 horas, de forma que o volume de água permaneça constante. Passado o período de ebulição, deixa-se a água esfriar de forma natural até atingir a temperatura de $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$. Em seguida, as amostras são retiradas da água, enxugadas com pano úmido e pesadas para registrar a massa saturada (m_{sat}).

O cálculo da absorção de água de cada amostra é realizado através da Equação 5.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

m_{sat} = massa da amostra saturada;

m_s = massa seca da amostra.

O resultado é expresso em porcentagem, com duas casas decimais, realizando a média das determinações obtidas.

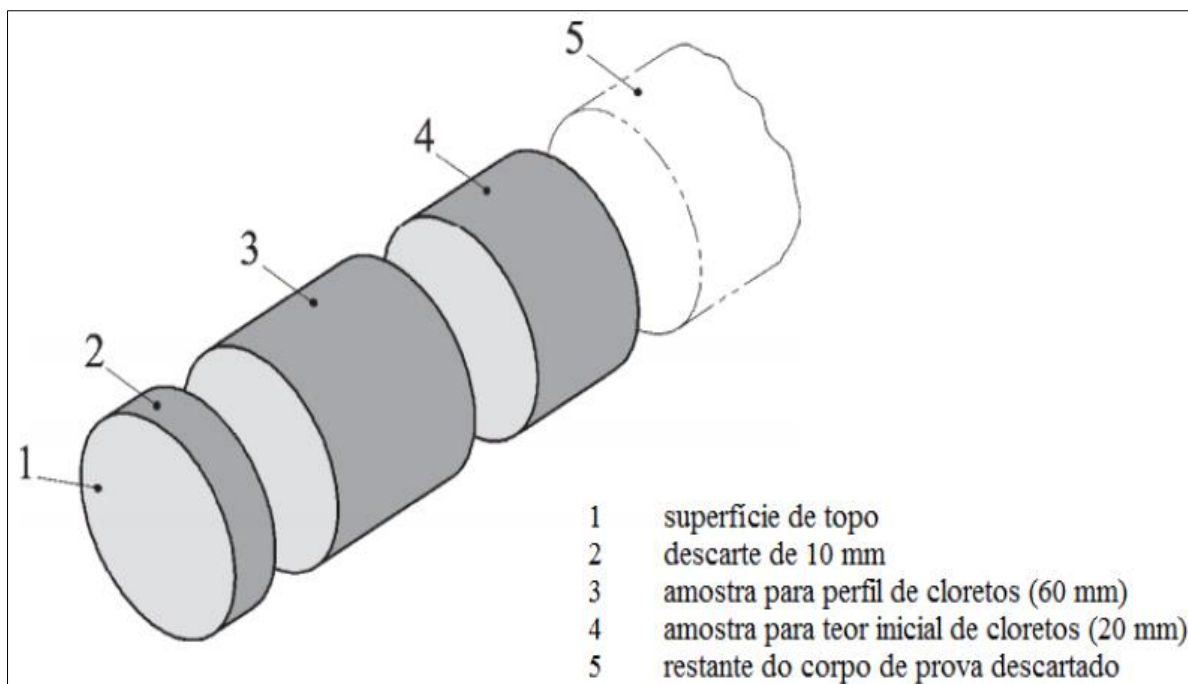
3.2.4 Penetração de cloretos - análise visual por aspersão de nitrato de prata

Para determinar a penetração de cloretos em cada traço estudado, realizaram-se ensaios conforme a norma britânica BS EN 12390-11 (2015), a qual, em regime não estacionário, determina a concentração final e inicial de cloretos em uma amostra. A seguir explica-se os procedimentos da norma.

Conforme a norma britânica acima citada, as amostras para o ensaio são constituídas por três corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. Inicialmente, os corpos de prova permanecem durante 28 dias sob cura saturada. No 14º dia de cura, cada amostra é repartida, como mostra a Figura 13. Dessa forma, uma das duas sub-amostras será utilizada para definir o teor inicial e a outra, que deve ser vedada lateralmente, com silicone por exemplo, será destinada para determinar o perfil de cloretos. Em seguida, todas as amostras são novamente dispostas sob cura saturada por mais 14 dias, porém, utilizando água deionizada, até a data dos ensaios.

Após os 28 dias de cura saturada, as amostras para determinação do perfil de cloretos são armazenadas durante 18 horas em uma solução contendo hidróxido de cálcio. Posteriormente, as mesmas são transferidas para um ambiente de exposição, no qual permanecem durante 90 dias em uma solução com 3% de cloreto de sódio (NaCl). Já as amostras utilizadas para definir o teor inicial de cloretos são imediatamente testadas, retira-se uma camada de 1 mm da superfície da amostra, com o objetivo de moer 20 gramas de pó para realizar análise, que resulta em um teor de cloreto solúvel em ácido, expresso em percentual sobre a massa de concreto.

Figura 13 - Divisão dos corpos de prova para o ensaio de difusão de cloretos



Fonte: Costa (2015).

Após 90 dias de exposição em solução com NaCl, determina-se o perfil de cloretos. São extraídas oito camadas da amostra, com profundidade de 1 mm cada, trituras a seco, resultando em amostras de 5 gramas cada. Após as análises, o teor de cloreto solúvel em ácido é expresso em percentual sobre a massa de concreto. Contudo, com o resultado das concentrações e as médias das alturas de penetração (determinadas com o auxílio de dispersão de nitrato de prata após o rompimento por compressão diametral) é possível esboçar o perfil de cloretos das amostras através de uma regressão não-linear e a partir da 2ª Lei de Fick.

Entretanto, após analisar o experimento de difusão de cloretos realizado por Costa (2015), constatou-se que o ensaio acima descrito não é viável, devido às dificuldades encontrados pelo autor em realizar a retirada das camadas de pó. Desta forma, optou-se em adaptar o procedimento citado pela norma britânica BS EN 12390-11 (2015), realizando-se apenas uma análise das alturas de penetração de cloretos a partir de dispersão de nitrato de prata, respeitando os 28 dias de cura saturada e a imersão em solução contendo NaCl.

Com a alteração do ensaio, a primeira etapa foi executada da seguinte forma. Foram moldados por traços 2 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, que ao 14º dia de cura foram repartidos, transformando-os em amostras com dimensão de 8 cm de altura por 10 cm de diâmetro, assim totalizando 4 CPs por mistura. Na mesma data, todos os CPs foram impermeabilizados lateralmente com SikaTop 100. Em seguida, foram mantidos em cura saturada até o 28º dia, quando então, foram inseridos em uma solução com água contendo 3% de NaCl. As amostras permaneceram na solução por 90 dias. A realização desta etapa do ensaio pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 - Primeira etapa do ensaio de penetração de cloretos



Fonte: Autor (2018).

3.2.5 Relação custo-benefício

Foi determinada a melhor relação custo-benefício dentre os cinco traços estudados. Destacando-se aquele que possuiu o desempenho mínimo exigido pelas normas vigentes quanto aos critérios de durabilidade ao menor custo de fabricação, considerando apenas o valor comercial dos materiais empregados no traço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo objetiva-se apresentar os resultados de todos os ensaios propostos, os quais serão descritos e exibidos através de análise de gráficos, tabelas e imagens.

Os experimentos foram executados de acordo com o que foi apresentado no capítulo anterior, métodos. Desta forma, tanto os experimentos de caracterização de agregados, quanto as análises de durabilidade do concreto no estado endurecido foram decisivos para determinar-se, ao final, o traço que realmente poderia ser empregado seguindo os requisitos estabelecidos por normas e atendendo o melhor custo-benefício para a empresa.

4.1 Comportamento do concreto no estado fresco

Com todos valores respectivos às propriedades dos materiais computados, determinados no capítulo anterior, foi possível determinar a quantia de material por m³ de cada traço. Apenas as quantidades de aditivo superplastificante foram determinadas durante a mistura, pois são variáveis de acordo com as propriedades dos materiais que os compõem. Desta forma, adicionou-se aditivo à cada mistura até que o concreto ficasse com um aspecto totalmente fluido. Na Tabela 11 verifica-se a composição de cada traço utilizado.

Tabela 11 - Composição dos traços utilizados

Material	Unidade	T-REF	T-10CCA	T-20CCA	T-10SA	T-20SA
Cimento	Kg/m ³	405,34	362,75	320,65	362,85	320,81
CCA	Kg/m ³	-	40,31	80,16	-	-
Sílica Ativa	Kg/m ³	-	-	-	40,32	80,20
Areia Fina	Kg/m ³	551,57	548,47	545,40	548,61	545,68
Areia Média	Kg/m ³	389,95	387,75	385,59	387,85	385,79
Brita 0	Kg/m ³	849,16	844,39	839,67	844,60	840,10
Água	Kg/m ³	220,63	219,39	218,16	219,44	218,27
Aditivo Superplastificante	Kg/m ³	5,24	3,54	3,19	3,49	4,34
	%	1,29	0,88	0,80	0,87	1,08

Fonte: Autor (2018).

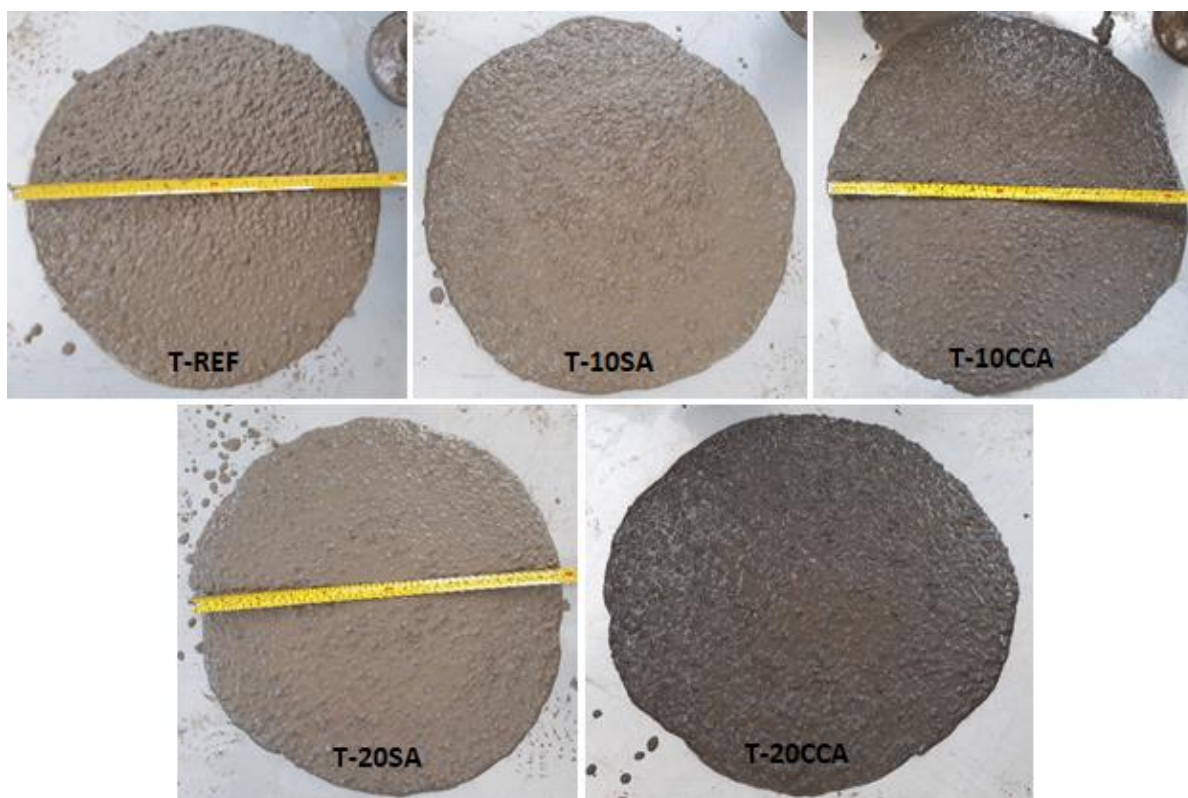
Para verificar as características do CAA no estado fresco, as propriedades de trabalhabilidade analisadas foram a fluidez, a coesão e a resistência à segregação. Dessa forma, o *Slump Flow Test* e o *L-Box Test* foram os métodos adotados para a verificação da trabalhabilidade. A seguir, podemos verificar que ambos os ensaios obtiveram um resultado satisfatório.

4.1.1 *Slump Flow Test*

Este ensaio é descrito pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e possibilita a verificação da coesão e da fluidez da mistura. O ensaio é dividido em três classes de espalhamento: SF 1 com abertura entre 550 a 650 mm, SF 2 com abertura entre 660 e 750 mm e SF 3 com abertura entre 760 e 850 mm. Para o presente estudo, todos os traços se encaixaram na classe SF 1, como pode ser visto nos resultados expostos na Tabela 12.

Na Figura 15, que apresenta o espalhamento das 5 amostras, é possível verificar, através de análise visual, que todas possuem sua mistura estável e homogênea, ou seja, não há indícios de segregação e exsudação do concreto. Dessa forma, todas se mostraram próprias para o uso.

Figura 15 - Amostras do ensaio *Slump Flow Test*



Fonte: Autor (2018).

4.1.2 *L-Box Test*

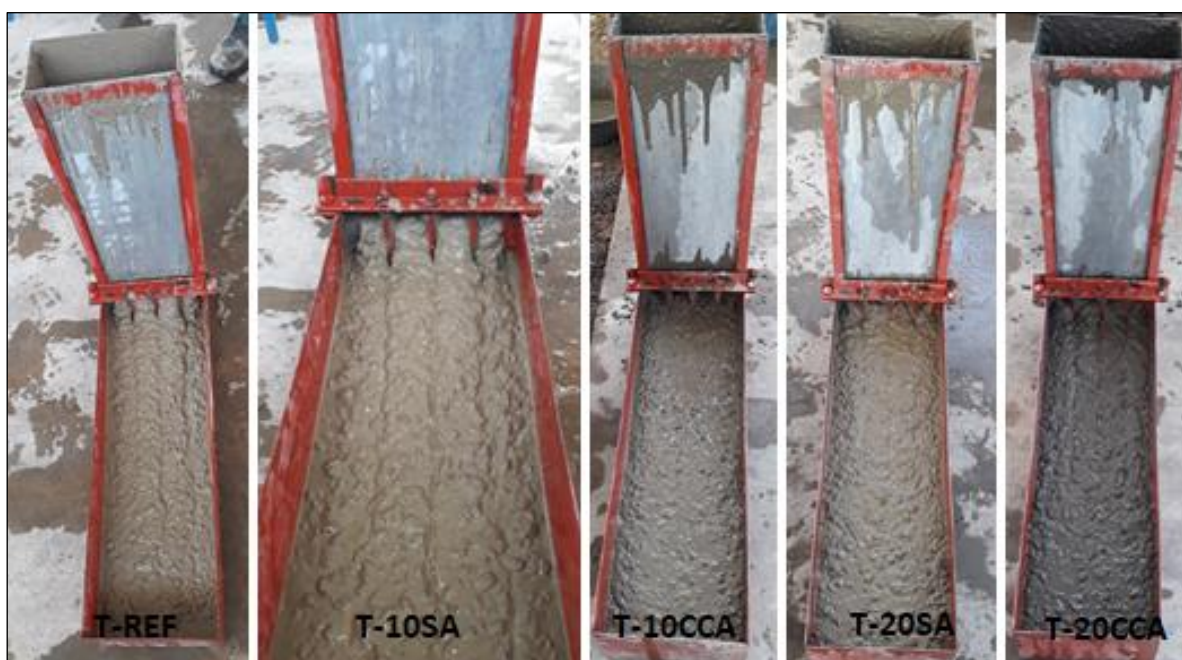
Por sua vez, este ensaio é descrito pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017) possibilitando também a verificação da coesão, mas principalmente a habilidade passante (HP) do concreto. Caracteriza-se por possuir uma boa habilidade passante a mistura que possuir o fator $H2/H1$ igual ou superior a 0,80, indiferente se a caixa possuir duas ou três barras de aço como obstáculo. Como pode ser visto na Tabela 12, em nenhum dos cinco ensaios o concreto atingiu a classe desejada.

No entanto, se analisarmos a Figura 16, na qual estão os resultados do ensaio, verifica-se nos cinco casos uma boa coesão, não havendo separação de materiais, e pouco ou nenhum indício de dificuldade do concreto passar entre as barras de aço do equipamento.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de *Slump Flow Test* e *L-Box Test*

Traço	Slump Flow Test (mm)	L-Box Test		
		H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	HP
T-REF	610	11,3	7,0	0,62
T-10CCA	650	11,0	7,2	0,65
T-20CCA	610	9,8	7,0	0,71
T-10SA	610	11,5	6,9	0,60
T-20SA	620	9,7	7,5	0,77

Fonte: Autor (2018).

Figura 16 - Amostras do ensaio *L-Box Test*

Fonte: Autor (2018).

4.2 Resistência à compressão

A resistência característica à compressão de cada traço estudado pode ser conferida na Tabela 13. A Tabela foi criada apenas com a maior resistência dentre os três corpos de prova rompidos por idade. No total foram rompidos 75 CP's, seguindo os requisitos da NBR 5739 (ABNT, 2007).

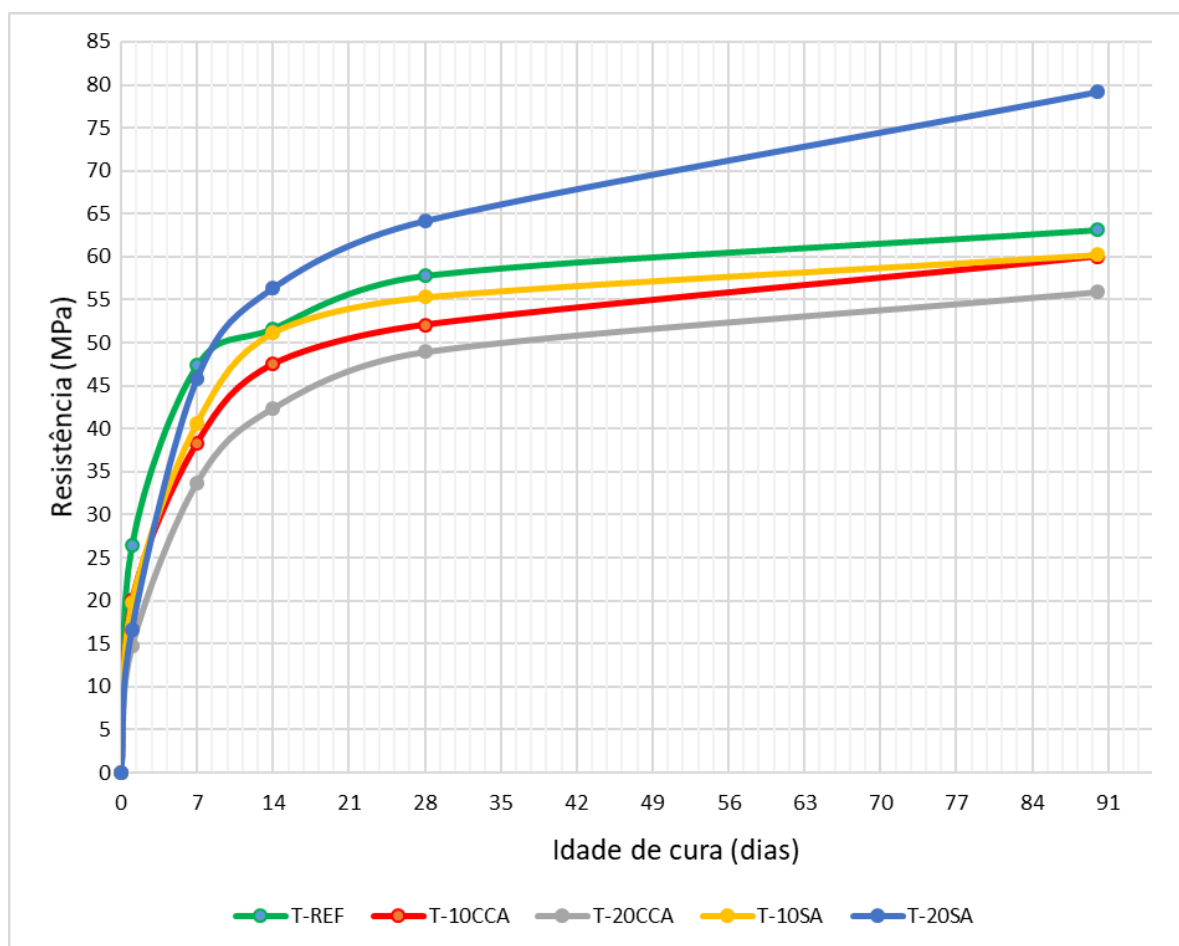
Na Figura 17 é exibido o gráfico de ganho de resistência à compressão em função da idade de cura dos traços de concreto.

Tabela 13 - Resultados de resistência à compressão dos traços estudados

TRAÇO	Resistência (MPa)				
	24 horas	7 dias	14 dias	28 dias	90 dias
T-REF	26,42	47,34	51,66	57,82	63,14
T-10CCA	20,05	38,36	47,51	52,08	60,01
T-20CCA	14,69	33,75	42,37	48,93	55,88
T-10SA	19,78	40,68	51,19	55,32	60,26
T-20SA	16,69	45,83	56,36	64,17	79,15

Fonte: Autor (2018).

Figura 17 - Ganho de resistência à compressão em função da idade



Fonte: Autor (2018).

A partir dos resultados encontrados verifica-se que todos os traços são aprovados com folga no que diz respeito à resistência característica à compressão, determinado no 28º dia de cura, sendo que para a classe de agressividade ambiental III a NBR 12655 (ABNT, 2015) exige que a resistência mínima deve ser de 30 MPa, valor alcançado por todas as misturas já no sétimo dia de cura.

Porém, para uma desforma segura das peças concretadas, a empresa fabricante estabelece que a resistência do concreto na idade de 24 horas deva ser de no mínimo 15 MPa, o que desta forma, reprova o traço T-20CCA, que atingiu 14,69 MPa na idade citada.

Pode-se destacar neste ensaio, o ganho de resistência do traço T-20SA, que obteve o maior ganho de resistência ao final dos ensaios (79,15 MPa), obtendo uma resistência superior a 25% se comparada ao traço T-REF. Entretanto, como é visível no gráfico, nas primeiras idades de cura o traço apresentou menor resistência se comparado ao traço referência adotado. Segundo Hoffmann (2001), isso se explica pelo fato da sílica ativa possuir propriedades pozolânicas, as quais tornam o tempo de hidratação inicial do cimento mais lento.

A alta resistência adquirida aos 28 dias de cura (superando os 48 MPa), também pode ser justificada pelo fato do aditivo superplastificante ter sido utilizado em quantia razoavelmente generosa. Porém, o uso do produto foi essencial para garantir a fluidez necessária aos traços executados, visto que a relação A/C não poderia ultrapassar o valor de 0,55.

4.3 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão seguindo os requisitos prescritos pela NBR 9778 (ABNT, 2005), possibilitou dos resultados expressos na Tabela 14 fossem encontrados, através do emprego de dois corpos de prova por traço.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

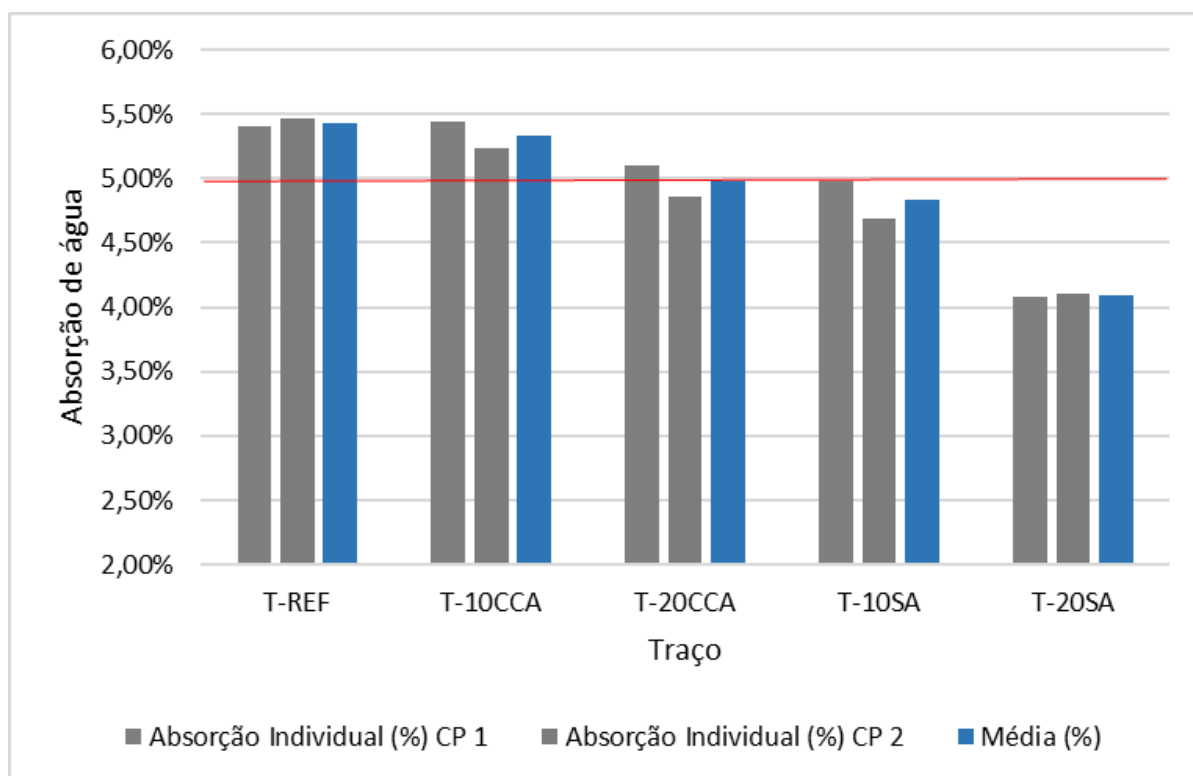
Traço	Absorção Individual (%)		Média (%)
	CP 1	CP 2	
T-REF	5,41%	5,46%	5,44%
T-10CCA	5,44%	5,23%	5,34%
T-20CCA	5,10%	4,86%	4,98%
T-10SA	4,98%	4,69%	4,84%
T-20SA	4,08%	4,10%	4,09%

Fonte: Autor (2018).

Para a classe de agressividade ambiental III, a NBR 8451-1 (ABNT, 2011) exige que os teores de absorção de água para os postes de concreto armado sejam inferiores a 5% em relação à média das amostras, ou no máximo 6,5% individual. Desta forma, constata-se a reprovação de dois traços, o T-REF e o T-10CCA, pelo fato da absorção média de suas amostras possuírem os percentuais de 5,44 e 5,34, respectivamente, ultrapassando os limites da norma.

Na Figura 18, na qual apresenta-se um gráfico com os respectivos valores de absorção encontrados nos ensaios, fica evidente o limite máximo de absorção permitido pela norma, sendo este destacado por uma linha vermelha no sentido horizontal.

Figura 18 - Comparativo de teores de absorção de água encontrados nos ensaios



Fonte: Autor (2018).

4.4 Penetração de cloretos - análise visual por aspersão de nitrato de prata

Após as amostras do ensaio permanecerem durante 90 dias imersos em solução contendo NaCl, foram retiradas do recipiente e secas ao ar livre. Em seguida, os 20 CPs foram rompidos através de compressão diametral (FIGURA 19) e sobre cada parte foi dispersado nitrato de prata.

Figura 19 - Rompimentos de CPs à compressão diametral e dispersão de nitrato de prata



Fonte: Autor (2018).

Portanto, na região da amostra onde houve presença de cloretos, o nitrato precipitou deixando-a com uma cor clara, enquanto que a região não penetrada adquiriu uma cor escura (FIGURA 21). Em seguida, com o auxílio de um paquímetro digital foram feitas as medições das alturas de penetração de cloretos. Efetuou-se três medições na parte superior e inferior de cada amostra, o que resultou em 48 medidas extraídas para cada concreto. Dessa maneira, fez-se a média para que fosse obtido um único valor para penetração de cloretos, e também, cálculos de variância e desvio padrão para representar o quão distantes os valores estão da média. Os resultados, expressos em milímetros, podem ser conferidos na Tabela 15.

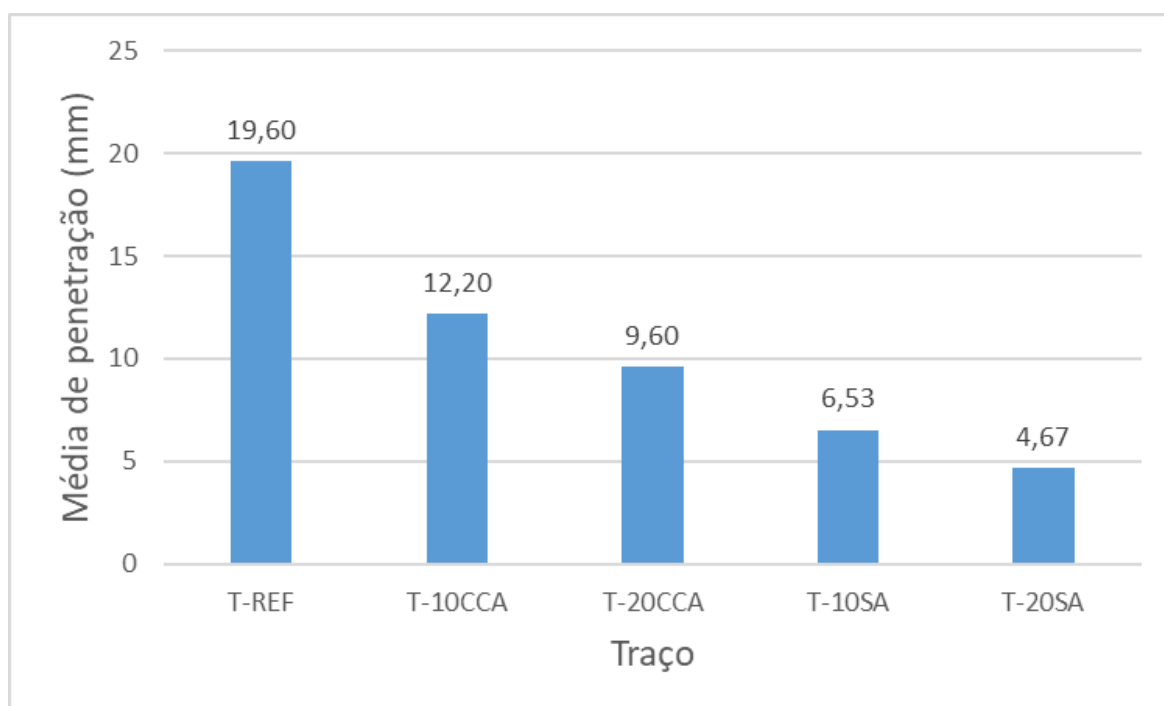
Tabela 15 - Análise das alturas de penetração de cloretos de cada traço analisado

TRAÇO	Média penetração de cloretos (mm)	Variância populacional (mm)	Desvio padrão (mm)
T-REF	19,60	2,59	1,61
T-10CCA	12,20	1,31	1,15
T-20CCA	9,60	1,11	1,05
T-10SA	6,53	0,44	0,66
T-20SA	4,67	0,88	0,94

Fonte: Autor (2018).

Pode-se afirmar que as alturas de penetração obtidas no traço T-10SA são mais uniformes do que as medidas dos demais traços analisados, sendo que quanto menor for a variância, mais próximos os valores estarão da média. Para realizar um comparativo dentre os traços analisados, a Figura 20 indica, através de um gráfico de barras, as alturas de penetração de cada mistura.

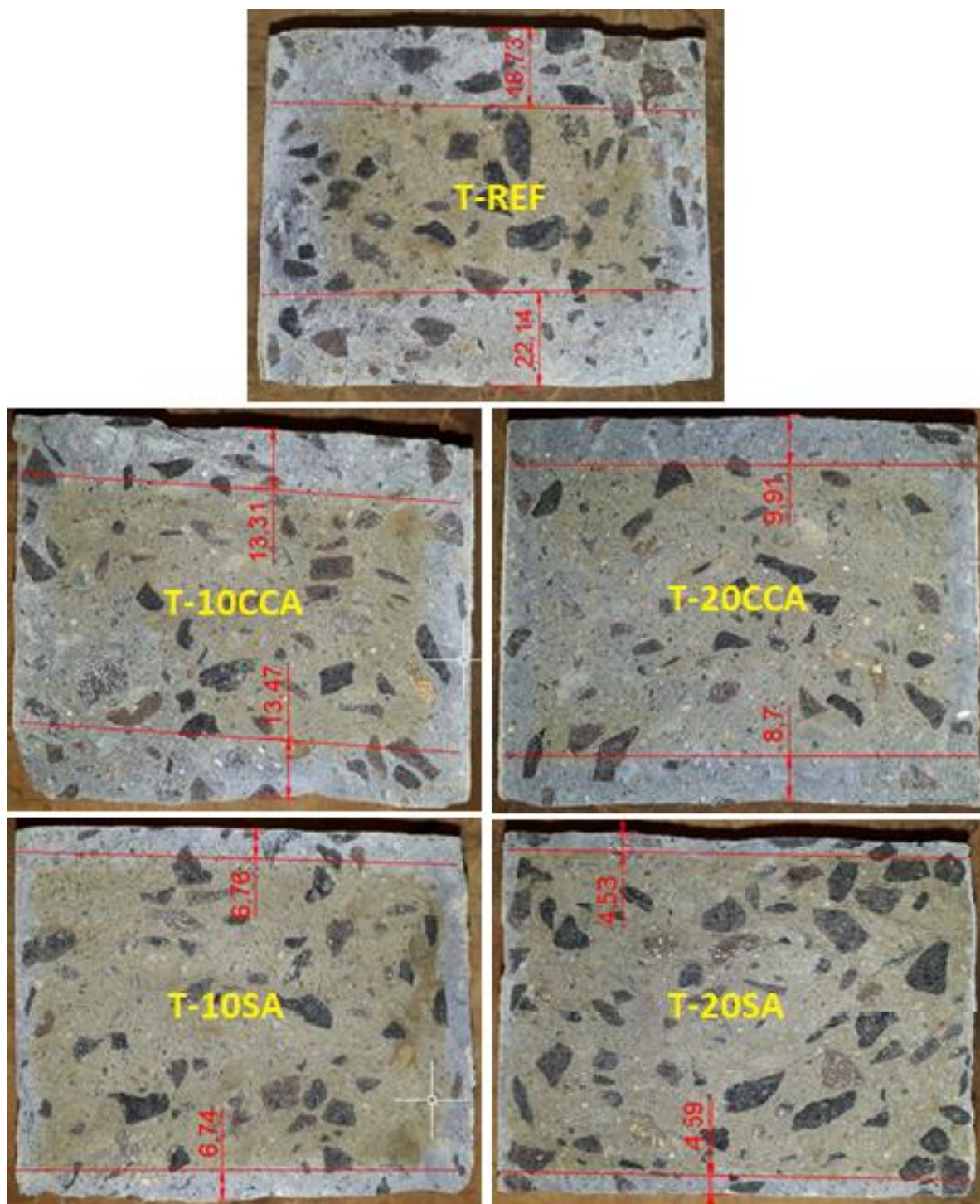
Figura 20 - Comparativo das alturas de penetração de cloretos



Fonte: Autor (2018).

A Figura 21 mostra uma amostra de cada traço, indicando as profundidades superiores e inferiores de penetração de cloretos, expressas em milímetros. Para tanto, foi utilizado o *software* AutoCad para que fosse possível inserir as medidas exatas de penetração.

Figura 21 – Altura de penetração de cloretos em uma amostra de cada traço



Fonte: Autor (2018).

Neste ensaio, destacaram-se os traços T-10SA e T-20SA, em que foram empregados em sua composição a sílica ativa, e apresentaram as menores profundidades de penetração de cloretos.

O traço T-20SA se comparado com o T-REF apresentou uma redução de 76% em relação à profundidade de penetração de cloretos, enquanto que o T-10SA apresentou 66% de redução. Estes ótimos resultados alcançados, segundo Hoffmann (2001), são possíveis pois a sílica ativa exerce um efeito pozolânico no concreto, reduzindo o tamanho dos poros e canais capilares conferindo assim menor porosidade às misturas. Dessa forma, no quesito durabilidade, os concretos com adições minerais adquirem alta resistência ao ataque de agentes agressivos externos.

4.5 Relação custo-benefício

No decorrer desta pesquisa, constatou-se que há vantagens no emprego de adições minerais no concreto, visto que foram verificadas melhorias em algumas propriedades, como na resistência à compressão (no traço T-20SA), na absorção de água e na penetração de cloretos. Assim sendo, foi feito um estudo de viabilidade econômica dos cinco traços desenvolvidos, para que fosse possível determinar qual a melhor opção para ser empregada na empresa, de modo que o traço escolhido atenda o desempenho mínimo exigido pelas normas vigentes e que possa ser financeiramente mais atrativo.

Levou-se em consideração para os custos dos materiais, apenas os valores comerciais, com o material sendo entregue na sede da empresa. Dessa maneira, custos como mão-de-obra, administrativos e energia, não foram contabilizados.

Na Tabela 16 apresentam-se os custos dos materiais e os respectivos valores por metro cúbico, expressos em reais, do traço referência analisado na pesquisa e do traço referência empregado pela empresa (T-EMP). Os valores da brita, areias, cimento (a granel) e aditivo são referentes ao mês de junho de 2018, e foram disponibilizados pela empresa parceira desta pesquisa. Os valores comerciais das adições de sílica ativa (em saco de 15 kg) e CCA (em saco de 20 kg) foram cotados externamente, respectivamente, com as empresas Tecnosil, da cidade de Itupeva/SP, e Builder, da cidade de Cachoeirinha/RS. Para a água, adotou-se o valor simbólico de 0,01 centavos por litro.

Tabela 16 - Comparação de custo de traços: referência pesquisa x referência empresa

Material	R\$/kg	T-REF		T-EMP	
		kg/m³	R\$/ material	kg/m³	R\$/ material
Cimento	0,373	405,34	R\$ 151,23	378,49	R\$ 141,21
CCA	0,900	0,00	R\$ -	0,00	R\$ -
Sílica Ativa	1,100	0,00	R\$ -	0,00	R\$ -
Areia Fina	0,041	551,57	R\$ 22,85	362,52	R\$ 15,02
Areia Média	0,039	389,95	R\$ 15,08	535,08	R\$ 20,69
Brita 0	0,015	849,16	R\$ 12,71	849,51	R\$ 12,71
Água	0,050	220,63	R\$ 2,21	246,46	R\$ 2,46
Aditivo Superp.	9,750	5,24	R\$ 51,06	2,27	R\$ 22,13
R\$/m³		R\$ 255,14		R\$ 214,23	

Fonte: Autor (2018).

Já na Tabela 17 são apresentados os valores, em reais por metro cúbico, dos traços com emprego de adições minerais. Os materiais e seus respectivos valores, os quais foram adotados nos cálculos, estão expressos na Tabela 16.

Tabela 17 - Comparação de custo de traços com utilização de adições minerais

T-10CCA		T-20CCA		T-10SA		T-20SA	
kg/m³	R\$/ material	kg/m³	R\$/ material	kg/m³	R\$/ material	kg/m³	R\$/ material
362,75	R\$ 135,34	320,65	R\$ 119,63	362,85	R\$ 135,38	320,81	R\$ 119,69
40,31	R\$ 36,28	80,16	R\$ 72,15	0,00	R\$ -	0,00	R\$ -
0,00	R\$ -	0,00	R\$ -	40,32	R\$ 44,35	80,20	R\$ 88,22
548,47	R\$ 22,72	545,40	R\$ 22,60	548,61	R\$ 22,73	545,68	R\$ 22,61
387,75	R\$ 14,99	385,59	R\$ 14,91	387,85	R\$ 15,00	385,79	R\$ 14,92
844,39	R\$ 12,64	839,67	R\$ 12,57	844,60	R\$ 12,64	840,10	R\$ 12,57
219,39	R\$ 2,19	218,16	R\$ 2,18	219,44	R\$ 2,19	218,27	R\$ 2,18
3,54	R\$ 34,50	3,19	R\$ 31,07	3,49	R\$ 34,00	4,34	R\$ 42,31
R\$/m³	R\$ 258,67	R\$/m³	R\$ 275,10	R\$/m³	R\$ 266,29	R\$/m³	R\$ 302,50

Fonte: Autor (2018).

Através dos comparativos realizados nas duas tabelas anteriores, podemos verificar que houve um acréscimo de 19,10% no valor do metro cúbico do traço T-REF se comparado com o T-EMP. Esse aumento deu-se pelo fato de que foi necessário aumentar o consumo de cimento no traço devido aos acréscimos de adições minerais nos teores de 20%, sendo que a quantia mínima de cimento por metro cúbico para a CAA III é de 320 kg.

Se fossemos determinar o traço com adição mineral com o custo mais baixo, destacaríamos o T-10CCA, que teve o menor acréscimo no valor se comparado com o T-EMP, 20,74%. Porém, o objetivo do trabalho é determinar o melhor custo-benefício, ou seja, o que, primeiramente, apresentar um desempenho mínimo exigido pelas normas vigentes, e conseqüentemente, o melhor custo em relação aos materiais.

Sendo assim, para determinarmos o traço que melhor se ajusta às especificações, temos que eliminar aqueles que não obtiveram resultados adequados nos ensaios anteriores. Desta forma, podemos descartar os traços T-REF e T-10CCA que ultrapassaram os limites máximos de absorção de água, e o traço T-20CCA pelo fato de não ter atingido a resistência mínima de 15 MPa com 24 horas de cura, solicitação exigida pela empresa para a desforma das peças concretadas.

Descartados os traços que não atendem os requisitos mínimos exigidos, podemos analisar a questão relativa ao custo para os traços T-10SA e T-20SA, únicos aprovados nos quesitos de desempenho. Analisando a Tabela 17, pode-se observar que entre os dois traços restantes, o T-10SA é o que possui maior atratividade financeira, obtendo um custo de 11,97% menor em relação ao T-20SA.

Contudo, o traço T-10SA, que apresentou o melhor custo-benefício, possui um valor 24,30% maior em relação ao T-EMP.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como principal finalidade adequar um traço de concreto para fabricação de postes empregados em regiões litorâneas, apresentando classe de agressividade ambiental III. Deste modo, analisou-se o atendimento aos critérios de durabilidade estabelecidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011) e determinou-se o traço com melhor custo benefício, levando em consideração apenas o valor comercial dos materiais utilizados.

Para tanto, foram desenvolvidos cinco traços de concreto autoadensável. Um traço referência, similar ao utilizado pela empresa fabricante de postes, porém com maior quantidade de cimento no traço, e outros quatro, substituindo parte do cimento por teores de 10% e 20% de adições minerais de sílica ativa e cinza de casca de arroz. Com o intuito de avaliar os traços quanto a durabilidade, foram realizados ensaios de trabalhabilidade, resistência a compressão, absorção de água e penetração de íons de cloretos.

A trabalhabilidade das misturas foi avaliada com a aplicação dos ensaios *Slump Flow Test* e *L-Box Test* pelos quais foi possível verificar os quesitos relacionados à coesão, fluidez e consistência dos diversos traços. Todas as misturas apresentaram um aspecto bom em relação à coesão e consistência, especialmente as com adições minerais. Quanto à fluidez, os objetivos foram alcançados, porém, os resultados poderiam ter sido mais eficientes, visto que a utilização de betoneira limitou a mistura do concreto por não possuir energia suficiente, impossibilitando um espalhamento do concreto com maior abertura.

A resistência à compressão dos variados traços avaliados através de rompimento de corpos de prova em formato cilíndrico foi satisfatória, visto que a resistência característica de 30 MPa foi atingida já no sétimo dia de cura em todos traços analisados. Destaca-se em especial o traço com utilização de 20% de sílica ativa, que aos 90 dias de cura obteve 79,15 MPa de resistência, maior valor encontrado, sendo 25% maior do que o traço T-REF. Segundo Hoffmann (2001), o concreto com utilização de sílica ativa possui essa característica, de adquirir maior resistência, pelo fato desta adição possuir partículas de extrema finura que ocupam os vazios de maneira mais efetiva, além de contribuir para o processo de hidratação do concreto pelo fato de possuir pontos de nucleação com o hidróxido de cálcio, auxiliando no desenvolvimento da resistência.

No ensaio de absorção de água por imersão pôde-se averiguar que dois traços não estavam aptos a serem expostos à CAA III, o T-REF e o T-10CCA, pois seus percentuais de absorção ultrapassaram o valor máximo de 5% estabelecido pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011). Desta forma, quanto maior a absorção de água no concreto, maior a porosidade do mesmo e maior capacidade e possibilidade de agentes agressivos adentrarem na estrutura, assim reduzindo sua vida útil.

Para analisar fatores semelhantes aos prescritos no parágrafo anterior foi realizado um ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata. Através do ensaio foi possível visualizar e comparar as profundidades de penetração de íons de cloreto dentre os cinco traços empregados. Constatou-se que o traço T-REF foi o que mais sofreu com o agente agressivo, sendo que aos 90 dias, houve uma penetração de 19,60 mm, 419,7% maior que o traço com menor penetração, o T-20SA. As adições minerais, por possuírem partículas finas, preenchem os vazios do concreto, impossibilitando ou reduzindo as chances dos agentes agressivos atingirem a armadura presente no interior da estrutura.

Finalizados os ensaios relativos a durabilidade, foi possível determinar o traço com melhor custo-benefício. Neste quesito, destacou-se o traço T-10SA, visto que este atendeu os requisitos mínimos exigidos por normas e, dentre os traços aprovados, foi o que apresentou o menor custo de produção, levando em consideração apenas o valor dos materiais utilizados. Tal comparativo pode ser observado na Tabela 18, sendo que as células em verde representam bons

resultados e as vermelhas, o contrário. Vale ressaltar, que o traço T-10SA, o mais viável para aplicação exigida, possui um custo de 24,30% maior se comparado com o atualmente utilizado pela empresa, porém, deve-se manter em mente que o traço em utilização no momento, só pode ser empregado na CAA II.

Tabela 18 - Comparativo entre os resultados obtidos de cada traço

Requisito	T-REF	T-10CCA	T-20CCA	T-10SA	T-20SA
Resistência 28 dias (MPa)	57,82	52,08	48,93	55,32	64,17
Resistência 24 horas (MPa)	26,42	20,05	14,69	19,78	16,69
Absorção de água (%)	5,44	5,34	4,98	4,84	4,09
Penetração de cloretos (mm)	19,60	12,20	9,60	6,53	4,67
Custo-benefício (R\$)	255,14	258,67	275,10	266,29	302,50

Fonte: Autor (2018).

Baseando-se nessas avaliações, torna-se visível a necessidade de realização de um controle tecnológico dos materiais, assim como estudos de aprimoramento de produtos, para que estruturas sejam fabricadas de forma correta, seguindo normas vigentes, fazendo com que haja o aumento de vida útil das mesmas, evitando problemas futuros.

Como sugestão de trabalhos futuros, são apresentadas as seguintes possibilidades de alteração, ou complementação:

- Realizar os mesmos ensaios, porém em escala real, utilizando um misturador de eixo vertical, que gerará mais energia na mistura, possibilitando maior abertura de espalhamento, resultando em um concreto autoadensável com melhor processo de aplicação;
- Reduzir o teor da adição de sílica ativa no traço, para 5% e 7%, dessa maneira conseguindo baixar o custo da mistura;
- Realizar ensaio de modo a obter os teores de íons de cloreto presentes nos diversos traços executados.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. **A distribuição de energia**, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Acesso em: 02 out. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202**: Standar Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Philadelphia: ASTM, USA, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 8451-1**: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 8451-4**: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 4: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BOTELHO, Manoel H. C.; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2015. v. 2.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 12390-11**: Testing hardened concrete – Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. London: BSI, UK, 2015.

COSTA, Fernanda B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DE SÁ, Augusto; LENZI, Janaína R. **Concreto e postes de concreto**. 2003. Disponível em: < <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Diego&Janaina.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2017.

FIGUEIREDO, Enio P.; HELENE, Paulo. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FUSCO, Péricles B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo: Pini, 2008.

GARCIA, Douglas A. A.; DUZZI JR., Francisco E. Capítulo II Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, 74. ed., p. 52-63, mai. 2012. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/capitulo-ii-topicos-de-sistemas-de-transmissao-e-de-distribuicao-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

GIACON JÚNIOR, Milton. **Propagação de ondas de ultra-som em protótipos de postes tubulares de concreto armado**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Área de Concentração Construções Rurais e Ambientais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GIAMMUSSO, Salvador E. **Manual do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

GOMES, Paulo C. C.; BARROS, Alexandre R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HOFFMANN, Anelise T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

JOUKOSKI, Alex. **Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneos**. 2003. 264 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

KOPSCH, Wilson. **Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho: estudo de caso**. 2001. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

LACERDA, Charles S.; HELENE, Paulo. Estudo da durabilidade, frente à penetração de íons cloretos, em concretos de alto desempenho com metacaulin. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO – IBRACON, 45., 2003, Vitória/ES. **Anais...** Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, Kirke A. W. **Estudo das manifestações patológicas na produção de pré-fabricados de concreto**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas de concreto** – Capítulo 3. 2003. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Acos.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2017.

READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION OF ONTARIO. **Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete**. Mississauga: RMCAO, January 2009.

REGINATO, Lucas A. **Otimização de traços de concreto: estudo aplicado a postes de concreto armado visando o aumento da vida útil**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RODRIGUES, Edmilson C. **Concreto fresco e as suas propriedades**. Webartigos, 17 mai. 2017. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos/concreto-fresco-e-as-suas-propriedades/81326>>. Acesso em: 20 out. 2017.

SACIOTO, Adriano P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura**. 2005. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SOUZA, Vicente C. M.; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TOSTES, Maria E. de L. **Distribuição de energia elétrica**. 2012. 36 f. Apostila – Disciplina de Distribuição de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2012.

TUTIKIAN, Bernardo F.; DAL MOLIN, Denise C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

TUTIKIAN, Bernardo F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, Bernardo F. **Proposição de método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. 163 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.



UNIVATES

Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000

www.univates.br | 0800 707 08 09